

PELIGROSIDAD SÍSMICA DEL ECUADOR Y DESCRIPCIÓN DE LOS PUENTES CONSTRUIDOS SOBRE EL ESTUARIO DEL RÍO ESMERALDAS, CON AISLADORES DE BASE FPS

Roberto Aguiar Falconí

Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército.

Av. El Progreso s/n. Valle de los Chillos, Quito-Ecuador

Correo Electrónico: raguiar@espe.ecu.ec

RESUMEN

Se presentan mapas de peligrosidad sísmica del Ecuador en términos de la aceleración máxima del suelo rocoso, para cuatro períodos de retorno. Para desarrollar esto, se ha determinado: veinte áreas fuente, magnitudes máximas esperadas y leyes de atenuación del movimiento del suelo.

Las áreas fuente fueron obtenidas en base a los siguientes estudios: geodinámicos, tectónicos, geología, sismos históricos e instrumentales registrados hasta el 2009 por las redes sísmicas del Instituto Geofísico de la Politécnica Nacional, el Instituto Geofísico de Perú, y el Centro de Información Nacional de Terremotos.

Posteriormente, se detallan los aspectos constructivos de tres puentes con aisladores de base FPS (Frictional Pendulum System), ubicados sobre el estuario del Río Esmeraldas y que tienen luces de 108, 120 y 160 m.

SUMMARY

The seismic hazard maps of Ecuador are presented in terms of the peak acceleration of the rocky soil, for four return periods. To achieve this, end it has been determined: twenty source areas, its expected peak magnitudes and a mitigation law for the seisms associated to the local faults.

The source areas were obtained on the basis of the following studies: geodynamics, tectonics, geology, the historical and instrumental seisms registered until 2009 by the seismic networks of the Geophysical Institute of the Politécnica Nacional, the Geophysical Institute of Peru, and the National Earthquake Information Center.

To establish the expected peak magnitude of each source area, an equation was obtained first, which relates the peak magnitude with the rupture longitude, which was determined on the basis of the isoist curves of intensity with the Mercalli scale. Then, this equation was applied to an intensity seismic hazard map of Ecuador.

Later, the constructive issues are detailed from three bridges with isolators of base FPS (Frictional Pendulum System), located on the River Esmeraldas and which have lengths of 108, 120 and 160 m.

1 SISMICIDAD Y GEODINÁMICA DEL ECUADOR

El Ecuador se encuentra en la zona de mayor peligrosidad sísmica del mundo, en el denominado Cinturón Circunpácifico donde se libera la mayor cantidad de energía sísmica a nivel mundial, de ahí el gran acierto de construir estructuras con aisladores de base, debido a que estos dispositivos de control pasivo son los encargados de disipar la energía sísmica y hacen que las estructuras se comporten en el rango elástico.

En este artículo se presentan los detalles constructivos de tres puentes con aisladores de base pero antes de ello se indican aspectos relacionados con la Peligrosidad Sísmica del País, empezando por la sismicidad histórica y concluyendo con una propuesta de zonificación sísmica; luego de ello se describirán los tres puentes que se hallan en el estuario del Río Esmeraldas.

1.1 Sismicidad Histórica

Sismos históricos en Ecuador, con intensidades macrosísmica mayores de VIII, son en orden cronológico, los acaecidos en abril de 1541 en Napo; en agosto de 1587, en Pichincha; el 15 de marzo de 1645, que afectó a las provincias de Chimborazo, Tungurahua; el 29 de agosto de 1674, en Chimborazo y Bolívar; el 22 de noviembre de 1687, en Tungurahua; el 20 de junio de 1698, en Tungurahua y Chimborazo; el 12 de junio de 1736, en Pichincha y Cotopaxi; el 20 de enero de 1749, en Loja; el 28 de abril de 1755, en Pichincha; el 22 de febrero de 1757, en Cotopaxi y Tungurahua; el 10 de mayo de 1786, en Chimborazo; el 4 de febrero de 1797, en Chimborazo, Tungurahua, Cotopaxi y parte de Bolívar y Pichincha con miles de muertos, este sismo causó la destrucción de la antigua capital del Chimborazo, Liribamba, que en la época era una de las ciudades más importantes del Ecuador. Gallego (2006).



Figura 1 Daño registrados en el sismo de 1949.

Continuando con la lista de macro sismos, se tienen los registrados el 20 de enero de 1834, en Carchi, Nariño; el 22 de abril de 1859, en Pichincha, Imbabura y Cotopaxi; el 15 de agosto de 1868, en Carchi; el 16 de agosto de 1868, en Imbabura, Carchi y Pichincha; el 3 de mayo de 1896, en Manabí; el 31 de enero de 1906, en Esmeraldas, Nariño (límites con Colombia; según Gutenberg, 1951, el segundo sismo con más liberación de energía en el siglo XX); el 23 de septiembre de 1911, en Chimborazo y Bolívar; el 23 de febrero de 1913, en Loja, Azuay; el 31 de mayo de 1914 en Pichincha y Cotopaxi; el 5 de febrero de 1923, en Pichincha; el 16 de diciembre de 1923, en Carchi, Nariño (Colombia), muy cerca de la frontera; el 18 de diciembre de 1926, en Carchi otra vez; el 25 de agosto de 1929, y el 10 de agosto de 1938, en Pichincha; el 4 de mayo de 1942, en Manabí, Guayas y Bolívar; el 5 de agosto de 1949, con epicentro cerca de Pelileo dejándose sentir con fuerza en Ambato, Tungurahua, Chimborazo y

Cotopaxi con miles de pérdidas humanas. En la figura 1 se muestra el daño en una parte de la ciudad de Ambato. Debe mencionarse que después del sismo de 1949 se publicó en forma urgente el Primer Código Ecuatoriano de la Construcción.

Prosiguiendo, se tienen los siguientes sismos: el 12 de diciembre de 1953, en Loja, norte del Perú; el 20 de agosto de 1955, en Pichincha e Imbabura; el 19 de enero de 1958, en Esmeraldas; el 8 de abril de 1961, en Chimborazo; el 19 de mayo de 1964, en Manabí; el 10 de diciembre de 1970, en Loja, El Oro y Azuay al norte del Perú; el 9 de abril de 1976 que causó mucho daño en Esmeraldas. Nuevamente y como en 1949 se publicó en 1979, el Segundo Código Ecuatoriano de la Construcción.

Más recientemente, se debe mencionar al sismo del 5 de marzo de 1987, en Napo, Sucumbíos e Imbabura, que dejó mil millones de dólares en pérdidas, no por las estructuras destruidas sino por lo que el País dejó de recibir al romperse una parte del oleoducto y suspender la explotación petrolera.

Últimamente los macro sismos registrados son el 2 de octubre de 1995, en Morona Santiago y el 4 de agosto de 1998, en la Provincia de Manabí. El sismo del 2 de octubre de 1995 ocasionó el colapso de un puente colgante de 135 m., como se aprecia a la izquierda de la figura 2. Aguiar (2000). A la derecha aparece el edificio El Calipso que falló durante el sismo de 1998, las secciones transversales de este edificio tenían gran ductilidad pero el edificio como tal tenía muy poca redundancia (nueve columnas en total). Aguiar *et al.* (1998).



Figura 2 Estructuras colapsadas durante los sismos de 1995 y 1998.

Como en el pasado, luego del sismo de 1998 se empezó a trabajar en el Tercer Código Ecuatoriano de la Construcción CEC-2000, pero en esta ocasión ya se incorporó al Código los resultados de investigaciones locales en zonificación sísmica y formas espectrales, fundamentalmente.

1.2 Geodinámica

La tectónica de placas que se tiene frente a la costa ecuatoriana, es una de las más complejas del mundo, lo que provoca que la zona de subducción en el Ecuador no sea uniforme como se aprecia en la figura 3. El movimiento de la placa de Nazca contra las placas de América del Sur y la placa del Caribe ha generado la mega falla Guayaquil – Caracas que es una falla transcurrente dextral. Toulkeridis (2009) lo ha identificado con el número 1, en la figura 3. Se estima que el movimiento de esta falla es de 3 a 4.5 mm/año Winter *et al.* (1993), sin embargo existen otros estudios en que indican que el movimiento es de 15 mm/año para la parte norte de Ecuador y de 13 mm/año para la parte sur de Colombia. Tibaldi y León (2003).

Con el número 2, en la figura 3, se indica la subducción de la placa oceánica de Nazca con una tasa de 58 ± 2 mm/año. En el siglo XX, se registraron cuatro grandes sismos en este segmento del Ecuador y son los sismos de 1906 ($M_w = 8.8$), 1942 ($M_w = 7.8$), 1958 ($M_w = 7.7$) y del 1979 ($M_w = 8.2$). Más adelante se va a hablar un poco más sobre estos sismos, lo único que se destaca por ahora es que el ángulo de subducción es diferente en la costa ecuatoriana.

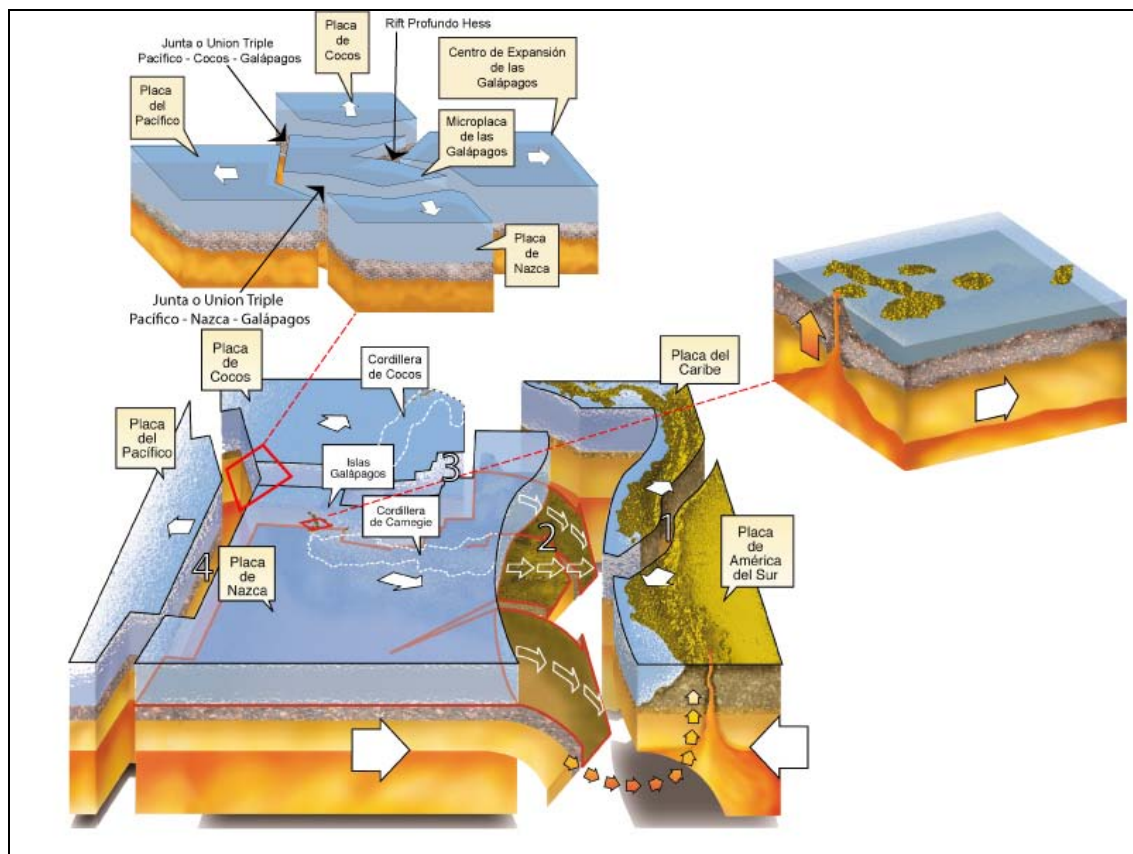


Figura 3 Geodinámica de la peligrosidad sísmica del Ecuador. (Fuente: Toulkeridis (2009).

En la figura 3 y con el número 3, Toulkeridis (2009) hace referencia a Cresta de Carnegie, que es una cordillera submarina que se originó en el punto caliente de Galápagos y que se está expandiendo hasta llegar a la fosa ecuatoriana. Se supone que debido a este movimiento tectónico hay una reducción de la sismicidad en el región interandina. Ruff (1996), Swenson y Beck (1996).

1.3 El sismo de 1906 frente a Esmeraldas

En 1906 a nivel mundial se registraron tres grandes terremotos, el primero de ellos fue frente a la costa de Esmeraldas, Ecuador el 31 de enero, con una magnitud estimada entre 8.6 y 8.8. El segundo de ellos el 18 de abril, en San Francisco, USA, con una magnitud entre 7 y 8. El tercero el 16 de agosto, en Valparaíso, Chile, con una magnitud entre 8.2 y 8.4. Todas ellas son magnitudes en la escala M_w .

De los tres terremotos el que más daño causó fue el de San Francisco, debido a que entre 225000 y 300000 habitantes perdieron sus viviendas de un total de 400000 habitantes. Muchas de las viviendas fueron dañadas por el incendio que se originó con el sismo. El número de muertos sobrepasa las 3000 personas. Wikipedia (2009).

El terremoto de Valparaíso también causó mucho daño en los barrios Almendral, Estero de las Delicias y Plaza Aníbal Pinto, el número de muertos también sobrepasa las 3000 personas. Este sismo se inició alrededor de las 8 de la noche y tuvo una duración de cuatro *credos*. Manns (1972). La intensidad de este sismo fue de VIII en la escala MSK-64. Astroza (2007)

El número de víctimas por el terremoto de Esmeraldas, fue bajo pero el número de muertos por el tsunami que llegó aproximadamente 30 minutos después fue entre 1000 y 1500 personas. Al momento del terremoto la marea estaba baja, las olas del tsunami fueron muy destructivas en la zona ecuatoriana formada entre los ríos Santiago y Mataje. En la zona Colombiana en Tumaco se observaron olas largas por un espacio de cuatro horas. INOCAR (2009).

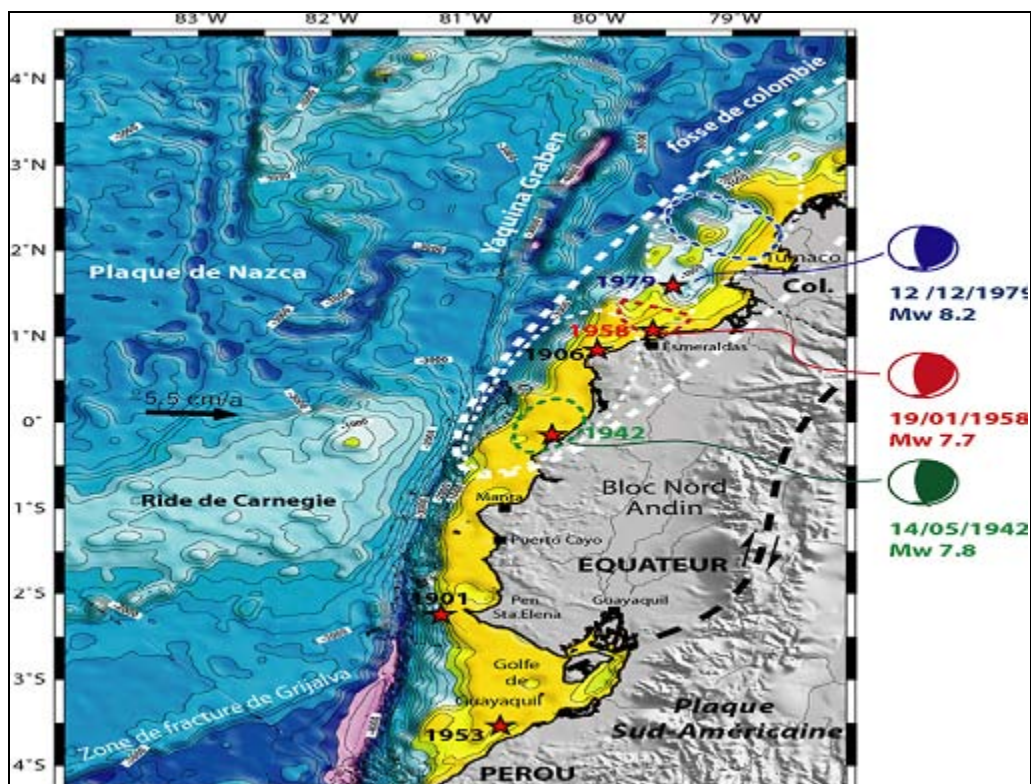


Figura 4 Área de ruptura de los sismos de 1906, 1942, 1958 y 1979. (Fuente: A. Alvarado)

Según Rudolph (1911) el terremoto de 1906 que se registro en las costas de Ecuador y Colombia tuvo una gran sacudida vertical que va desde Bahía de Caráquez al sur de Ecuador hasta Guaipi y la desembocadura del río Timbiqué en el norte de Colombia, con una extensión de alrededor de 450 km. En Quito este sismo fue sentido pero solo horizontalmente.

Rudolph (1911) destaca el hecho de que en Tumaco era imposible permanecer en pie durante el sismo pero las edificaciones de madera tuvieron un buen comportamiento ya que por su flexibilidad resistieron bastante bien el sismo que duró alrededor de 5 minutos.

En la figura 4 se indica el área de ruptura del sismo de 1906, con líneas entrecortadas más gruesas. Dentro de esta gran área se tienen las áreas de ruptura de los sismos de 1942, 1958 y 1979. Lo importante de todo esto es destacar que la energía liberada por el sismo de 1906 es mucho mayor a la suma de las energías liberadas por los sismos de 1942, 1958 y 1979, como se aprecia en la figura 5; tal vez se podría agregar a esta lista el sismo de Bahía de

90 Peligrosidad Sísmica del Ecuador y descripción de los puentes con FPS

Caráquez de 1998 que tuvo una magnitud de 7.2. Incluyendo este sismo la energía liberada por los sismos de 1942, 1958, 1979 y 1998 es aproximadamente el 15% de la energía liberada en el sismo de 1906. De tal manera que en esta zona existe una gran cantidad de energía acumulada lo que origina una gran peligrosidad sísmica a la costa ecuatoriana.

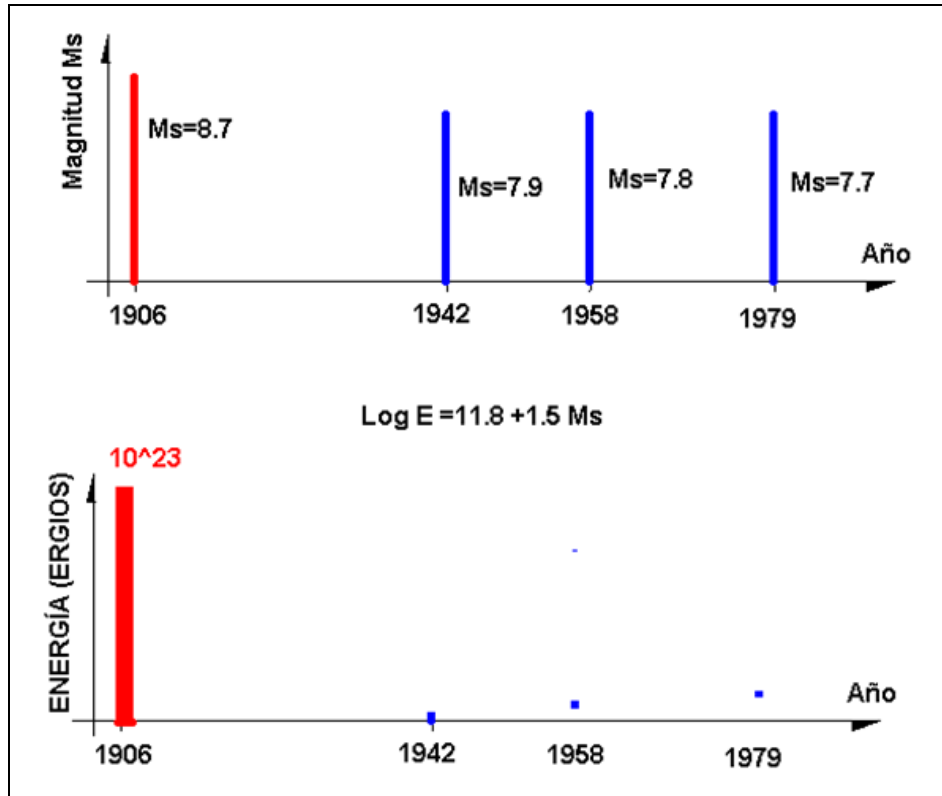


Figura 5 Magnitudes y energía liberada por los sismos de 1906, 1942, 1958 y 1979.

1.4 Sismicidad en la Costa Ecuatoriana

En el Ecuador, al 2010, se han construido tres puentes con aisladores de base tipo péndulo de fricción FPS en el estuario del río Esmeraldas; otro que une las ciudades de Bahía de Caráquez con San Vicente y tal vez es el puente de mayor longitud con aisladores FPS ya que tiene una longitud de 1.8 km.; además se tiene otro puente en la ciudad de Guayaquil con aisladores de base. Todos ellos se hallan en la costa ecuatoriana.

Ahora bien, con el propósito de ver la alta peligrosidad sísmica que se tiene en la zona donde se han construido los puentes de Esmeraldas y de Bahía de Caráquez, en la figura 6 se presentan los epicentros de los sismos registrados, desde -2 Sur a 2 Norte de latitud y desde 79 Oeste a 81.7 Oeste, hasta el 2009. El rectángulo representa el área de influencia de sismos que pueden afectar a los 4 puentes, no se incluye el puente de Guayaquil.

La base de datos con la cual se obtuvo la figura 6, proviene de cuatro redes sísmicas y son las siguientes: IGEPN Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional; IGP Instituto Geofísico del Perú; NEIC National Earthquake Information Center; INGEOMINAS Instituto Colombiano de Geología y Minas; El IGP tiene información sísmica desde latitud 0 hacia el Sur; INGEOMINAS por su parte tiene información desde latitud 0 hacia el Norte; adicionalmente se cuenta con la información de la NEIC. Con todo esto se complementa la información sísmica, es importante destacar esto ya que los estudios de peligrosidad sísmica serían bastante inciertos si se trabaja con datos de una sola red.

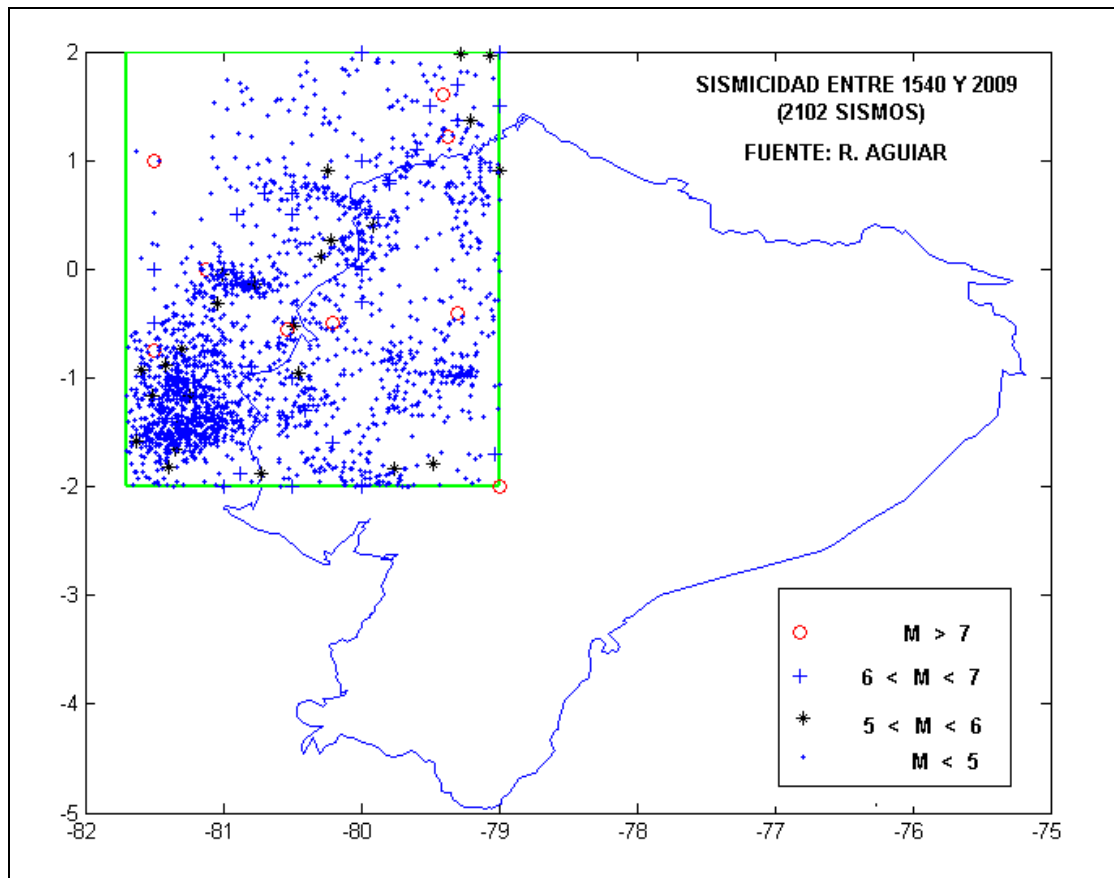


Figura 6 Sismicidad entre 1540 y 2009 registrados en área cercana a los puentes con aisladores.

Adicionalmente, la mayor parte de estos sismos tienen su foco superficial, lo que les hace más destructivos. En la figura 7 se indica la profundidad focal de los sismos cuyos epicentros se muestran en la figura 6.

1.5 Fallas Geológicas

En la figura 8 se presentan varias poblaciones de la provincia de Esmeraldas, cuya capital es la ciudad de Esmeraldas. Pero hay dos aspectos muy importantes que destacar en esta figura el primero de ellos es la presentación de las fallas geológicas en la provincia y el segundo la magnitud máxima de los sismos que se esperan tanto en el Continente como en el Océano. Chunga (2009). Se aprecia que en algunas regiones se espera magnitudes M_w entre 7.2 y 7.7 (Ver donde dice Súa).

En la figura 8 se aprecian las fallas de: San Lorenzo, Esmeraldas, Canandé, Galera, Buga, Quinindé y Cañaveral. No aparecen las fallas de: Mira, Mataje, La Boca, Concepción, Santiago, Tambo, Carayaca, Carolina y Muisne. Chunga (2009).

La gran cantidad de fallas geológicas que se tienen es el producto del choque de las placas tectónicas anotadas anteriormente. Estas zonas de fallamiento, figura 8, generan sismos superficiales de ahí que una buena parte de los hipocentros indicados en la figura 7, correspondientes a sismos que se encuentran alejados de la costa, son superficiales.

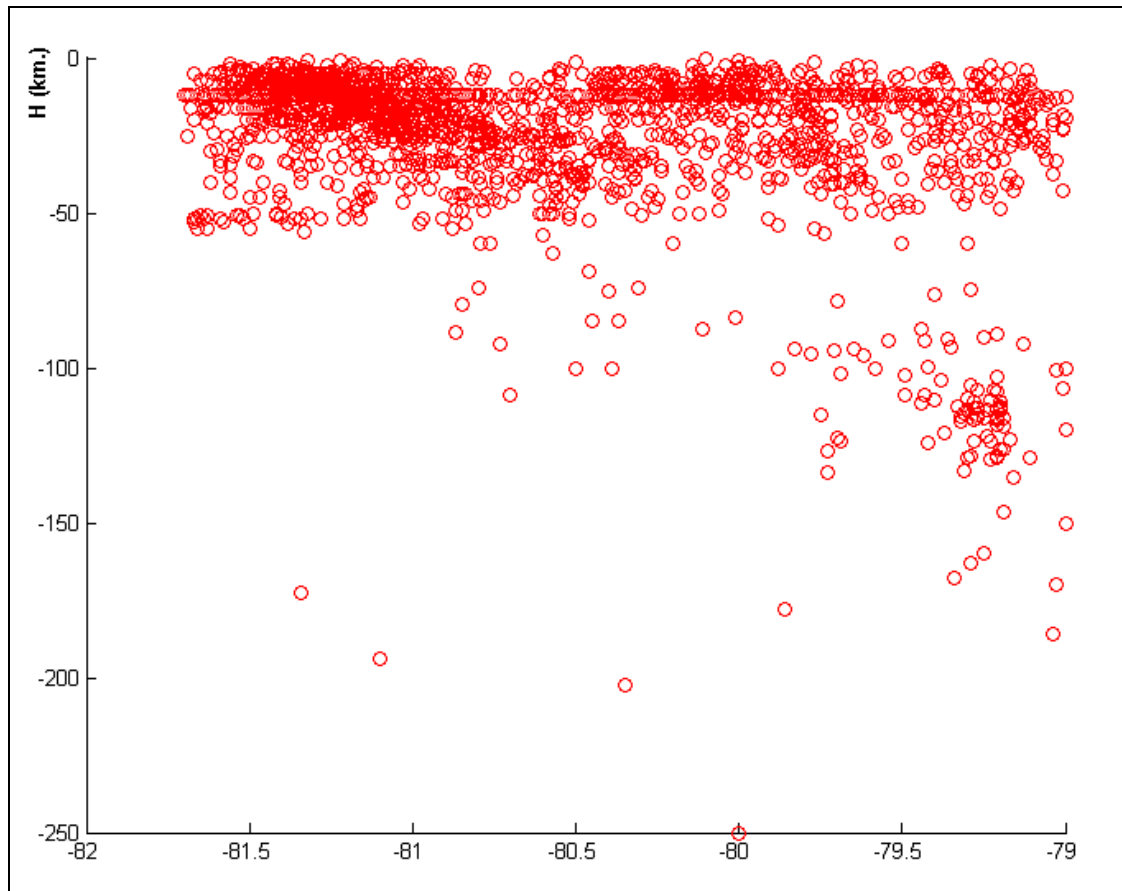


Figura 7 Profundidad focal de sismos indicados en figura 1.6

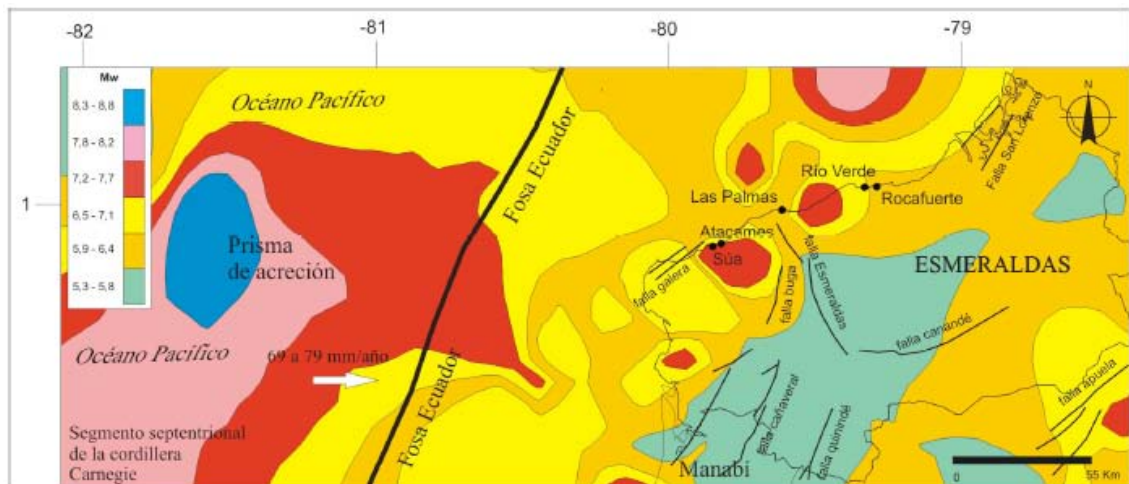


Figura 8 Principales fallas geológicas en la Provincia de Esmeraldas. (Fuente: Chunga 2009)

Los tres puentes con aisladores de base FPS, están ubicados en el estuario de Esmeraldas y se encuentran muy cerca de las fallas que en la figura 9, Eguez *et al.* (2003) las ha identificado como 2a (Falla Esmeraldas, sección norte); 2b (Falla Esmeraldas, sección sur); 4 (Falla Galera) y 5 (Falla Buga. De estas cuatro la primera es la que mayor influencia tiene en el proyecto y presenta un movimiento dextral, con dirección N20°W.

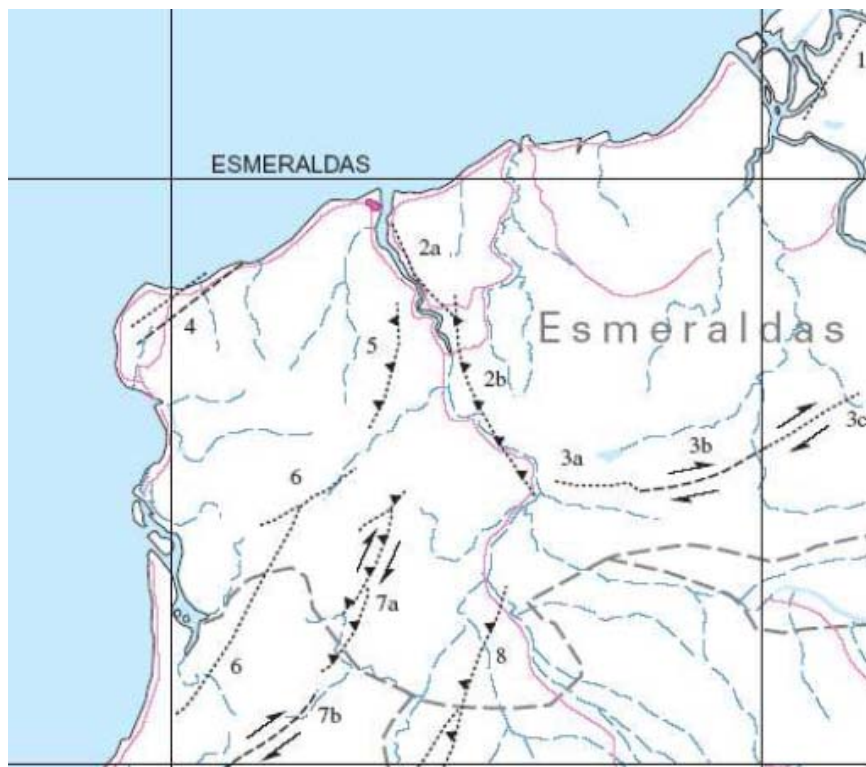


Figura 9 Fallas geológicas muy cercanas a la ciudad de Esmeraldas. (Fuente: Eguez *et al.* 2003).

2 PELIGROSIDAD SÍSMICA DEL ECUADOR

Existen dos formas de evaluar la peligrosidad sísmica de un sitio, la primera mediante métodos determinísticos (DSHA Deterministic Seismic Hazard Analysis) y la segunda mediante métodos probabilísticos. (PSHA Probabilistic Seismic Hazard Analysis). En un estudio de peligrosidad sísmica conviene que se lo haga de las dos formas.

Con el Método Determinístico se puede encontrar el espectro que se espera en determinado punto para el caso de que se active una falla geológica de interés, claro está que el espectro dependerá del tipo de suelo del punto de interés pero lo importante es destacar que existen varios métodos semi empíricos para el efecto. Campbell y Bozorgnia (2008); Abrahamson y Silva (2008); Chiou y Youns (2008); Boore y Atkinson (2008). La metodología de Campbell y Bozorgnia (2008) ha sido incorporada al software CEINCI-LAB. Aguiar (2010).

Con el Método Probabilístico en cambio se trabaja en forma macro y se halla el valor de la aceleración máxima del suelo en roca A_0 que se va a indicar como se calcula en los siguientes apartados. Esto involucra la determinación de zonas fuentes, leyes de atenuación, magnitud máxima esperada, etc.

2.1 Zonas Fuentes

Las zonas fuentes son volúmenes de litósfera asociados a ciertas características tectónicas donde se presume que pueden ocurrir sismos con origen tectónico similar. Estas zonas se determinan en base a la sismicidad registrada, a la tectónica, a la geología y con la sismicidad histórica.

Se pueden definir tres tipos de zonas fuentes, a saber: puntuales, lineales o

superficiales, estrictamente estas últimas son volumétricas de gran tamaño. Considerando la gran incertidumbre que se tiene, lo mejor es trabajar con zonas fuentes volumétricas en tres dimensiones.

Para el Ecuador, Aguiar y Castro (2009,1) han definido 20 zonas fuentes, 11 de ellas están asociadas al fallamiento cortical y 9 a la subducción. Para definir estas zonas fuentes, primero se analizaron trabajos realizados en el pasado por Aguiar (1982), Palacio *et al.* (1987), Proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair (1988) y García y Peñafiel (2000).

Por otro lado se estudiaron importantes contribuciones científicas sobre tectónica y geología realizadas por Baldock (1982), Iglesias *et al.* (1991), Eguez *et al.* (2003), Toulkeridis (2009) y Chunga *et al.* (2009).

Finalmente se trabajó con una base de datos conformada por 6800 sismos, registrados entre 1540 y 2009. Como se indicó esta información fue obtenida de cuatro redes sísmicas.

Las zonas fuentes para los sismos corticales se indica en la figura 10 y para los sismos de subducción en la figura 11. Con el propósito de visualizar en tres dimensiones la geometría de las zonas fuentes, en la figura 12 se indican tres cortes, realizados en 1° S, 2.5° S, 4°S y 6°S., donde también se indican los hipocentros de los sismos registrados con magnitud mayor o igual a 6.

2.2 Leyes de Atenuación

Las leyes de atenuación son expresiones que relacionan magnitud-distancia-intensidad sísmica. Entendiéndose por esta última palabra a la aceleración, velocidad, desplazamiento e intensidad propiamente dicha de eventos sísmicos; estas relaciones se obtienen de los datos que existen sobre los parámetros mencionados. La forma general una ley de atenuación, es la siguiente:

$$\log y = C_1 + C_2 * M - C_3 \log R - C_4 R + \varepsilon_a + \varepsilon_e \quad (1)$$

Donde y puede ser el desplazamiento, velocidad, aceleración o intensidad; en lugar de tener logaritmo de base 10 se puede tener logaritmo natural; M es la magnitud; R puede ser la distancia epicentral o también puede ser la distancia hipocentral; C_1, C_2, C_3, C_4 son constantes que se determinan en base a los datos con los cuales se trabajan; ε_a es la incertidumbre aleatoria, se la obtiene en base a los datos de trabajo; ε_e es la incertidumbre epistémica.

Existen cuatro métodos para hallar las leyes de atenuación y son los siguientes: i) Métodos Empíricos; ii) Métodos Estocásticos; iii) Métodos Teóricos; iv) Métodos Empíricos híbridos.

En el caso de Ecuador se utilizó un método empírico para hallar la ley de atenuación para el Ecuador. El modelo contempla simetría radial de las intensidades sísmicas con respecto al foco y que la intensidad disminuye conforme la distancia se incrementa.

En los Métodos Estocásticos se consideran modelos sencillos para obtener la ley de atenuación, por ejemplo la inclusión explícita de una función que provea información del mecanismo de falla. Los Métodos Teóricos son derivados a partir de la dinámica de movimiento del suelo, por ejemplo se deducen leyes de atenuación a partir de un modelo de fuente finita. Gallego (2000). Finalmente, en los Métodos Empíricos Híbridos se combinan los Métodos Empíricos y los Métodos Estocásticos, las leyes de atenuación propuestas por Campbell y

Bozorgnia (2008) constituyen un ejemplo de los Métodos Empíricos Híbridos.

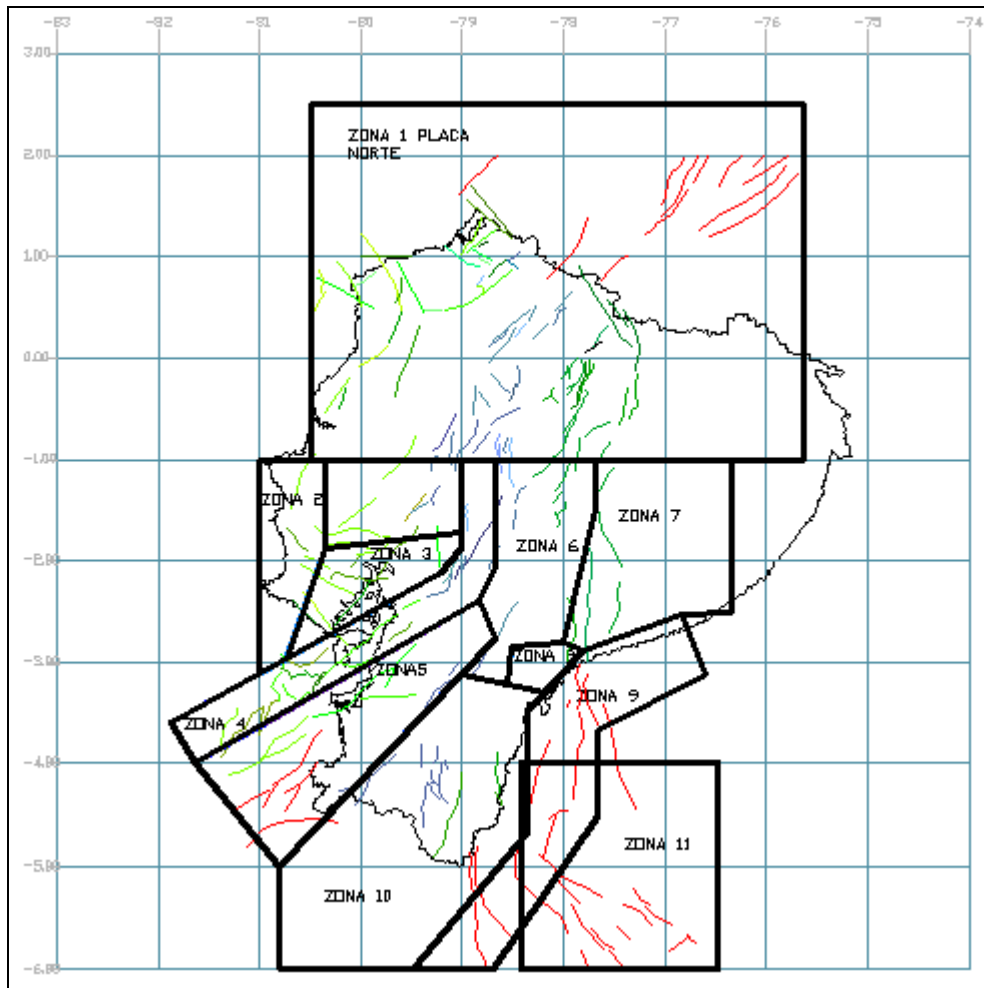


Figura 10 Zonas fuentes asociadas al fallamiento cortical. (Fuente: Aguiar y Castro 2009, 1)

El tema es tan importante que la revista Earthquake Spectra en el 2008 dedicó todo un volumen para tratar sobre leyes de atenuación y espectros, en el que se recoge las investigaciones realizadas por: Pacific Gas & Electric Company (PG&E); California Department of Transportation (CALTRANS), Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER); Earthquake Engineering Research Institute (PEER); Earthquake Engineering Research Institute (EERI); U.S. Geological Survey (USGS) y Southern California Earthquake Center. Uno de los artículos más importantes, sobre leyes de atenuación que trae esta revista es el de Campbell y Bozorgnia (2008) que sirve para obtener espectros de peligrosidad sísmica uniforme.

Dentro de los Métodos Empíricos, existen dos caminos para obtener una ley de atenuación, la primera trabajando con información macrosísmica y la segunda utilizando registros sísmicos. En el caso de Ecuador, el autor de este artículo ha trabajado con información macrosísmica por este motivo a continuación se hace una pequeña referencia histórica de las escalas de intensidad que existen y se indica la tendencia que se tiene al respecto, actualmente.

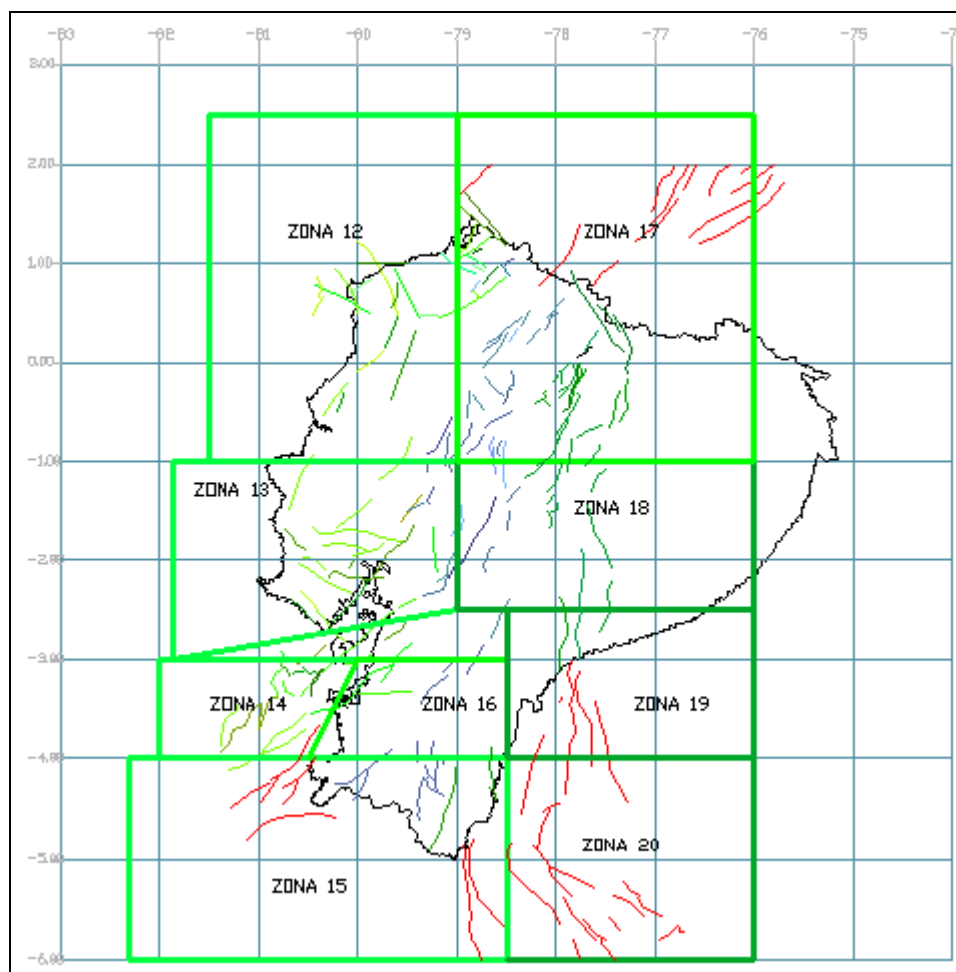


Figura 11 Zonas fuentes asociadas con la subducción. (Fuente: Aguiar y Castro 2009, 1)

En Gallego y Sarria (2006) se presentan las escalas de intensidades que existen que se resumen a continuación. La primera escala en aparecer fue la propuesta por Giuseppe Mercalli en 1902, con 10 grados; posteriormente en 1931 fue modificada a 12 grados esta escala por Harry Wood y Frank Neuman, pasando a llamarse escala MM. Finalmente Richter en 1956, modifica la escala de MM y es la que se tiene actualmente y con la cual se ha trabajado en el Ecuador.

En Europa y en algunos países de América del Sur, la escala que utilizan es la MSK-64 o simplemente MSK propuesta por Medvedev, Sponhuer, Karnik en 1964. Pero hay otras escalas más como la EMS-98, la JMA (Japan Meteorical Agency), también conocida como I_{JMA} ; la MMA-92 propuesta por Kuroiwa en Perú que no es más que la Mercalli Modificada adaptada a los Países Andinos.

En general las escalas de Intensidad miden los fenómenos percibidos por las personas y los daños registrados en la construcción. En la MSK-64 se detalla un poco más los tipos de estructuras y también se incorporan más aspectos sobre los cambios advertidos en la naturaleza por efecto de los sismos.

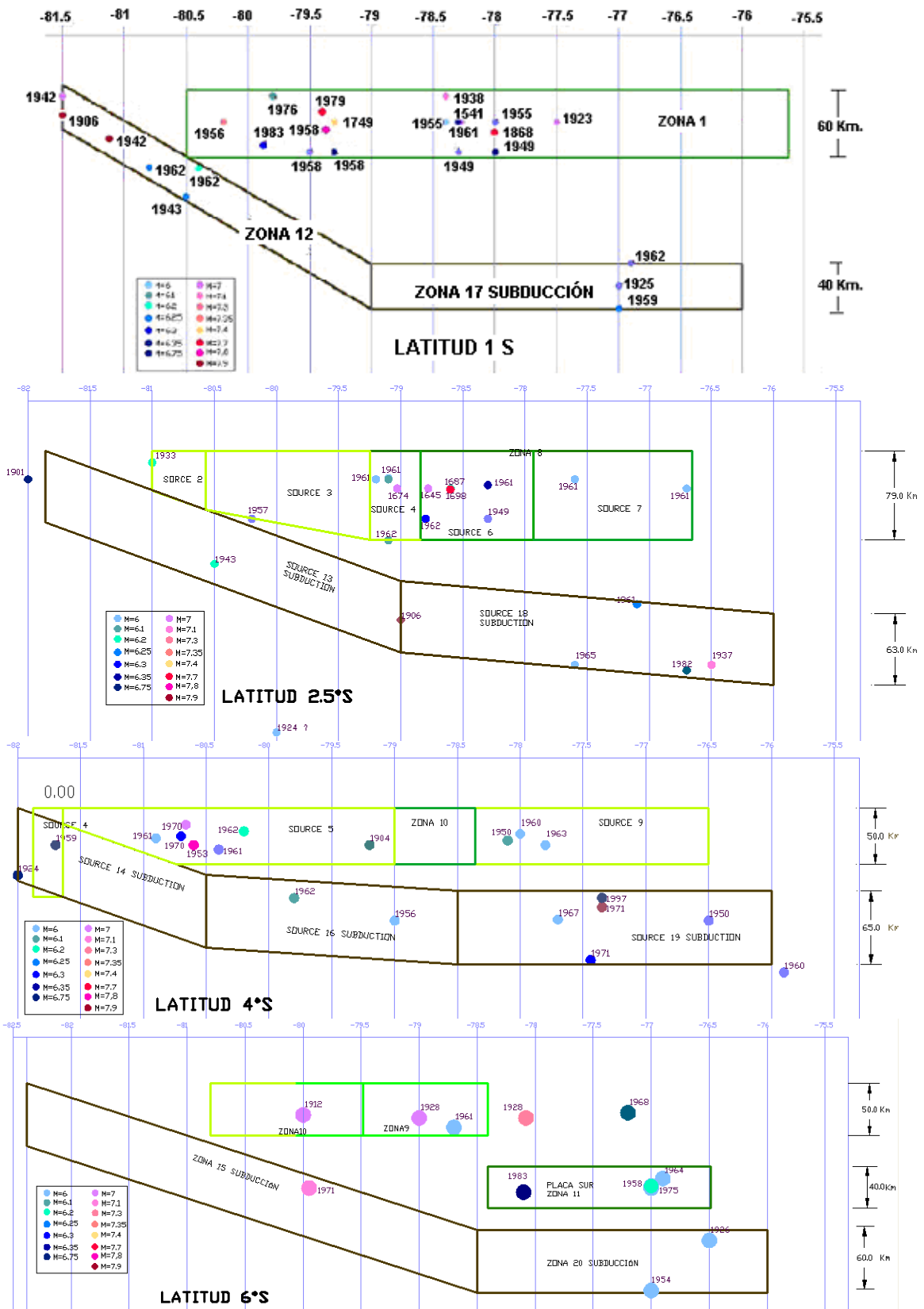


Figura 12 Cortes en latitudes: 1° S, 2.5° S, 4°S y 6°S. (Fuente: Aguiar y Castro 2009, 1)

Actualmente se está trabajando en una escala de intensidad macrosísmica denominada INQUA o ESI-2007, que mide los efectos geológicos y geomorfológicos de los suelos en los terremotos. De tal manera que es necesario volver a definir las curvas isosistas de los sismos históricos registrados entre 1540 y 1900 pero dando mayor importancia a la información cosísmicos en el terreno. Chunga y Michetti (2009).

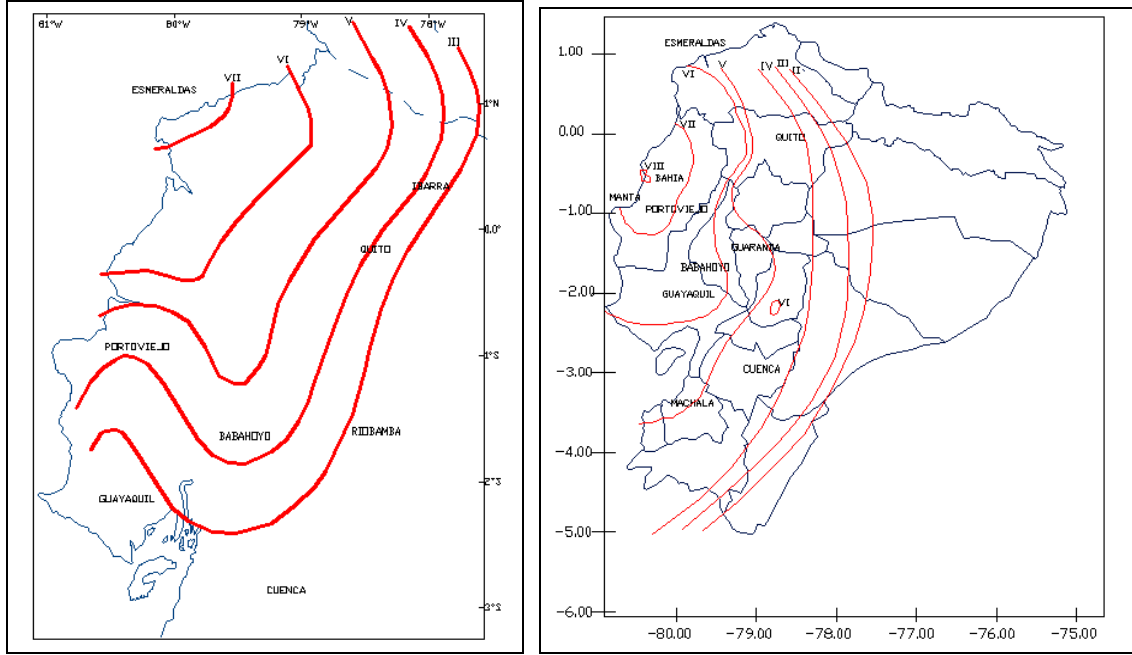


Figura 13 Isosistas de los sismos de Esmeraldas de 1976 y Bahía de Caráquez 1998.
(Fuente: J. Egred)

En la figura 13 se presentan dos isosistas de los sismos de Esmeraldas de 1976 y de Bahía de Caráquez 1998, realizadas por Egred (1999). A nivel macro las isosistas indican como fue la atenuación del suelo. Se puede hallar cual es, en forma aproximada, la longitud de ruptura del sismo siguiendo la metodología propuesta por Dorbath *et al.* (1990) en que básicamente indica que la longitud de ruptura es aproximadamente igual al eje mayor de la isosista de intensidad VIII en la escala MM; para trabajar con isosistas de menor intensidad, Callo y Tavera (2002) incorporan un parámetro k en la evaluación de la longitud de ruptura. De tal manera que la información macrosísmica proporciona importante información y la incertidumbre que se pueda tener se la cubre con la desviación estándar.

En la tabla 1 se indican los sismos utilizados para encontrar la ley de atenuación. Se indica además la distancia hipocentral D a cada una de las isosistas. Esta distancia se obtiene igualando el área de la isosista con el área de un círculo de radio D . En base a éstos datos se halló la ecuación:

$$I_{MM} = 3.3577 + 1.0013 M_w - 0.8856 \ln (D + 10) \quad (2)$$

Donde I_{MM} es la intensidad en la escala de Mercalli Modificada; M_w es la magnitud en la escala de Kanamori, también llamada magnitud Richter; D es la distancia hipocentral. Ahora para pasar de la intensidad a la aceleración del suelo, se utilizó la ecuación propuesta por Saragoni *et al.* (1982).

$$\log A_{\max} = 0.345 I_{MM} - 0.222 \quad (3)$$

Siendo A_{\max} la aceleración máxima del suelo en roca. Al reemplazar la ecuación (2) en la ecuación (3) se obtiene:

$$A_{\max} = e^{2.197 + 0.807 M_w - 0.714 (\ln(D+10))} \quad (4)$$

Tabla 1 Sismos considerados para encontrar ley de atenuación.
(Fuente: Aguiar y Castro 2009, 2)

#	SISMOS	FECHA	Mw.	D (Km).								
				X	IX	VIII	VII	VI	V	IV	III	II
1	RIOBAMBA	04-02-1797	7.70	25.25	49.14	88.69	136.20	182.40	230.90	276.76	392.23	
2	OTAVALO	16-08-1868	7.17	44.79	81.23	105.31	233.45	271.51				
3	ESMERALDAS	31/01/1906	8.60		29.48	84.76	153.57	215.94	291.26			
4	PASTO CALLE	15/09/1944	5.92				34.03	38.47	45.15			
5	PELILEO	05/08/1948	6.93	11.46	14.80	20.95	28.94	37.50	53.90	77.24		
6	AMBATO	05/08/1949	6.37		77.79	93.89	143.76		334.23			
7	NAPO	11/05/1955	6.98			40.06	66.71	180.72				
8	BAHÍA	16/01/1956	7.30			32.60	53.00	107.26	214.95	326.78		
9	ESMERALDAS	10/01/1958	7.80				101.97	146.89	219.59	284.28		
10	PASA	30/07/1960	5.97				22.14	24.28	30.99	55.86	88.02	
11	ALAUÍ	08/04/1961	6.35				26.63	43.15	57.47	83.58		
12	BAHÍA	19/05/1964	6.40			44.39	58.70	85.40	109.02	176.52		
13	NABÓN	22/03/1966	6.21			44.03	49.39	76.51	92.27	174.11		
14	PASTO CALLE	06/10/1976	5.92			12.64	17.82	24.02	43.76	74.62	103.96	
15	ESMERALDAS	09/04/1976	6.31				15.96	105.61	173.95	229.08	278.52	
16	TUMACO	12/12/1979	7.70		27.49	68.94	163.99	250.60				
17	BAEZA	03/05/1987	7.00		16.61	28.70	56.78	80.47	106.85	132.32	200.64	
18	BAHÍA DE CARÁQUEZ	08/04/1998	7.10			350.53	354.02	369.14	381.07	422.51	430.89	
19	MACAS	03/10/1995	6.90			160.93	202.61	222.90	247.40	257.29		
20	PUJILÍ	28/03/1996	5.72				33.57	42.07	60.69	83.82	118.03	174.42

En la evaluación de la peligrosidad sísmica del proyecto hidroeléctrico Chespi, en el Ecuador. JICA (1981) utilizaron leyes de atenuación obtenidas de registros sísmicos de otras partes del mundo. Concretamente utilizaron las leyes de atenuación de Mc Guire (1974); Katayama (1975), Oliveira (1974) y Okamoto; encontraron la aceleración máxima del suelo con cada una de ellas y seleccionaron la que dio mayores resultados. Por lo tanto, la peligrosidad sísmica la evaluaron en forma determinística. Estas ecuaciones de atenuación han sido dibujadas para una magnitud $M = 6$, en la figura 14 y se ha incorporado la propuesta por Aguiar y Castro (2009, 2), encontrando que esta ecuación presenta valores medios para distancias epicentrales menores a 60 km., y mayores a las halladas con las otras ecuaciones para distancias epicentrales mayores a 60 km.

Ruiz y Saragoni (2005) han obtenido leyes de atenuación, a partir de sismos registrados en Chile, para inter placa y para intraplaca; para dos tipos de suelo, que denominan: *Suelo en roca y suelo duro*, con velocidades de la onda de corte comprendidas entre $1500 > V_s > 360$ y roca dura, $V_s > 1500 \text{ m/s}$. A estos suelos se los denomina $S2$ y $S1$ en este artículo.

Además de ello presentan leyes de atenuación para la componente vertical del sismo. Es importante tener en cuenta la velocidad de las ondas de corte para la clasificación del tipo de

suelo ya que en otros países esto cambia.

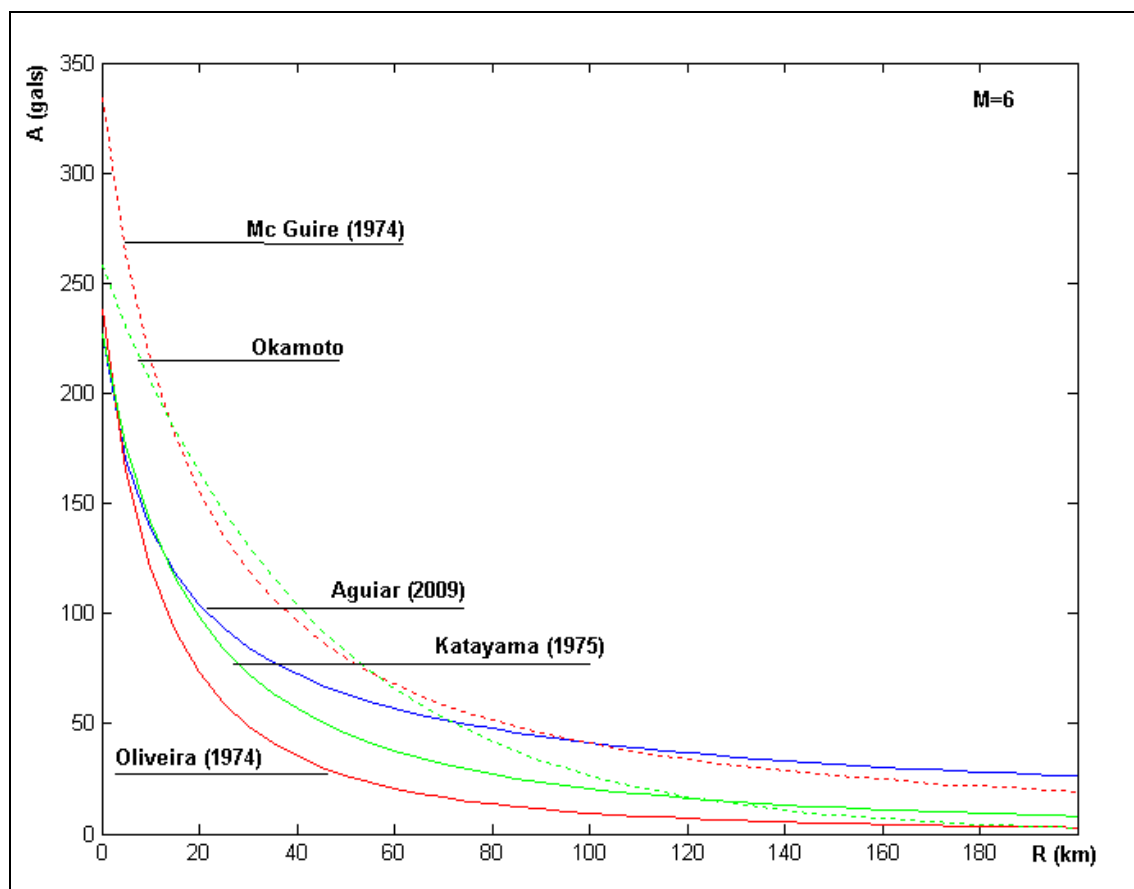


Figura 14 Comparación de leyes de atenuación utilizadas en proyecto Chespi.

En la figura 15 se presentan las leyes de atenuación halladas por Aguiar y Castro (2009, 2) y las encontradas por Ruiz y Saragoni (2005) para sismos intra placa, para una magnitud de 7. Se aprecia que la ley de atenuación de Aguiar y Castro (2009, 2) que no considera el tipo de suelo, presenta valores medios con respecto a las halladas con registros sísmicos chilenos para suelos S1 y S2.

El problema de la ecuación (4) radica que en el Ecuador se tiene muy bien diferenciados dos tipos de sismos, uno de fallamiento cortical y otros de subducción de tal manera que se debe tener dos leyes. Por este motivo Aguiar *et al.* (2010) en base a la información macrosísmica de 14 sismos asociados a fallas corticales y a 7 sismos de subducción, la mayor parte de ellos registrados en el Ecuador y unos pocos en el Sur de Colombia pero que afectaron al Ecuador, determinaron una Ley de Atenuación de Intensidades en la escala de Mercalli Modificada. Se tuvieron 69 datos para los sismos corticales y 38 datos para los sismos de subducción; además de esto se reemplazaron algunas isosistas como por ejemplo la del sismo de 1906. Ahora se trabajó con la que consta a la izquierda de la figura 16. Gallego y Sarria (2006). A la derecha de la figura 16 aparece una nueva isosista y corresponde al sismo de Tumaco de 1979.

Al proceder de esta manera se obtuvieron dos leyes de atenuación para el Ecuador, una para sismos corticales y otra para sismos de subducción. Estas leyes fueron comparadas con las de Ruiz y Saragoni (2005) que fueron obtenidas en base a registros sísmicos. Los resultados fueron muy satisfactorios como se aprecia en la figura 17. En la parte superior se presentan las leyes de atenuación para un sismo de magnitud 6 y en la parte inferior para

magnitud 7.

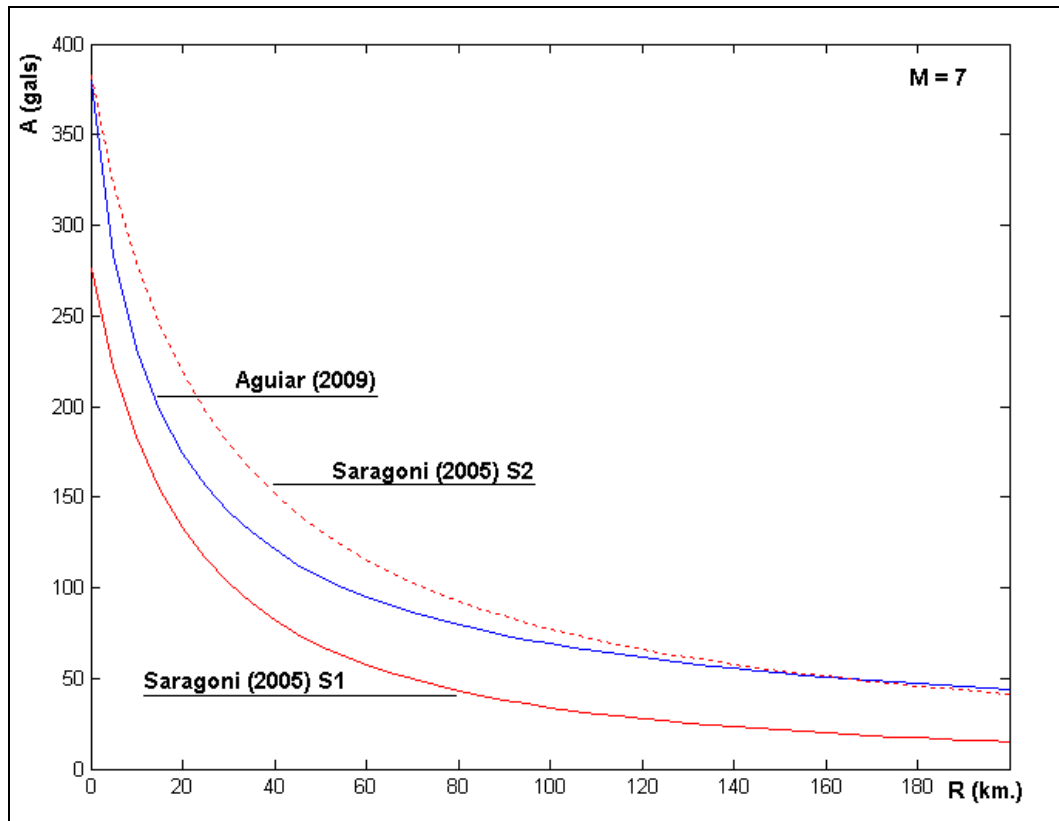


Figura 15 Leyes de atenuación de Ecuador y Chile

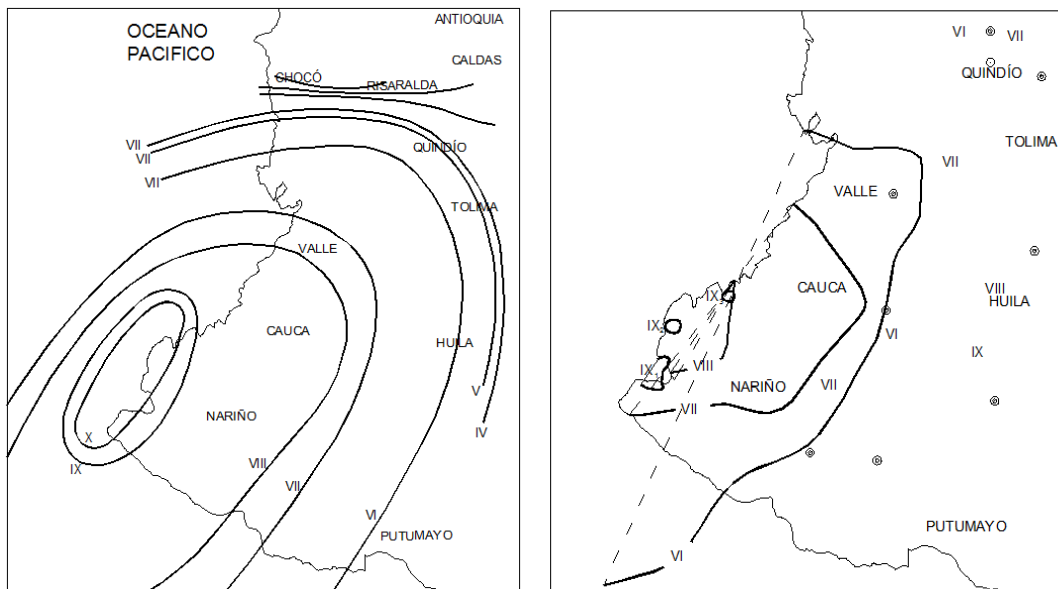


Figura 16 Isosistas de los sismos de Esmeraldas de 1906 y de Tumaco de 1979.

A la izquierda de la figura 17 se comparan las leyes para sismos corticales y ala derecha para sismos de subducción. Existe muy buena aproximación entre estas dos leyes.

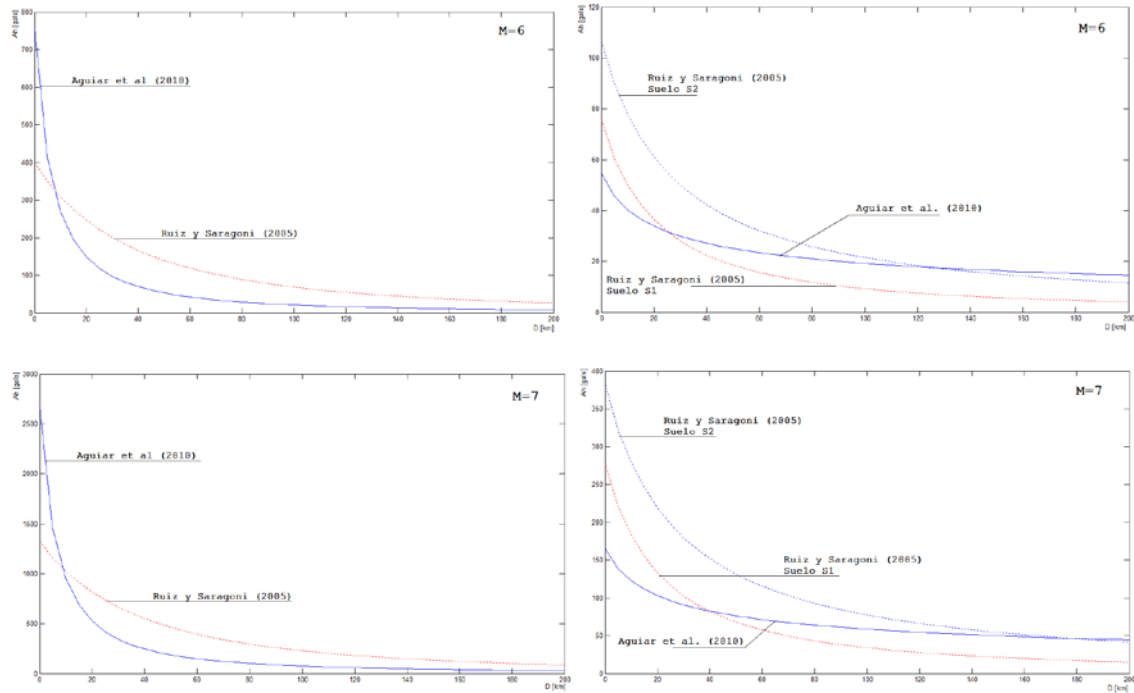


Figura 17 Comparación de leyes de atenuación de Chile y Ecuador. Segunda Propuesta.

2.3 Resultados de peligrosidad sísmica

Conceptualmente, el cálculo probabilístico de la peligrosidad sísmica no ha cambiado, se continúan utilizando la teoría desarrollada por Cornell (1969) y Algermissen (1976). Lo que si ha cambiado son los programas de ordenador para su evaluación. En la década de los años ochenta se utilizaba el programa de McGuire (1976) con una entrada de datos por tarjetas y ahora se cuenta con programas en que se facilita notablemente la entrada de datos y la salida de resultados como el programa CRISIS, Aguilar (2001). Se destaca que existe una versión muy moderna y muy compleja de utilizar del programa de McGuire.

La base del cálculo de la peligrosidad sísmica empleando Métodos Probabilísticos se sustenta en la siguiente ecuación.

$$P(Y > Y_{MAX}) = \int_{rc}^{rl} \int_{m_0}^{mu} P(Y > Y_{MAX} / m \wedge r) f_M(m) f_R(r) dm dr \quad (5)$$

Donde $P(Y > Y_{MAX})$ es la probabilidad de que el parámetro Y superé al valor de Y_{MAX} en una determinada zona fuente. El parámetro Y puede ser: intensidad modificada de Mercalli, aceleración del terreno, velocidad o desplazamiento; $P(Y > Y_{MAX} / m \wedge r)$ es la probabilidad condicional de Y si se produce un evento de magnitud m a una distancia r ; $f_M(m)$ es la función de densidad de la magnitud; $f_R(r)$ es la función de densidad de la distancia; m_0 es la magnitud mínima capaz de producir daño; mu es la máxima magnitud esperada en cada zona fuente; rc , rl distancia más corta y más larga de la fuente al sitio. Al considerar todas las fuentes sísmicas, la ecuación (4) se transforma en:

$$P(Y > Y_{MAX}) = \sum_{i=1}^{NF} \int_{rc}^{rl} \int_{m0}^{mu} P(Y > Y_{MAX} / m \wedge r) f_M(m) f_R(r) dm dr$$

Donde NF es el número de fuentes. Para cada una de las zonas fuentes indicadas en las figuras 10 y 11 se encontró la tasa anual de sismos con magnitud mayor o igual a 4.0, previamente se realizó el estudio de homogeneidad de la información sísmica; se determinó la magnitud máxima esperada; la magnitud máxima observada y se cálculo los coeficientes de la ley de Richter que definen el número de sismos esperados con magnitud mayor o igual que M .

En la figura 18 se presentan cuatro mapas de peligrosidad sísmica del Ecuador, en los que se muestra la aceleración máxima del suelo en roca para períodos de retorno de 47, 72, 475 y 970 años; que corresponden a los que VISION 2000 los denomina sismo: *frecuente*, *ocasional*, *raro* y *muy raro*. SEAOC (1995).

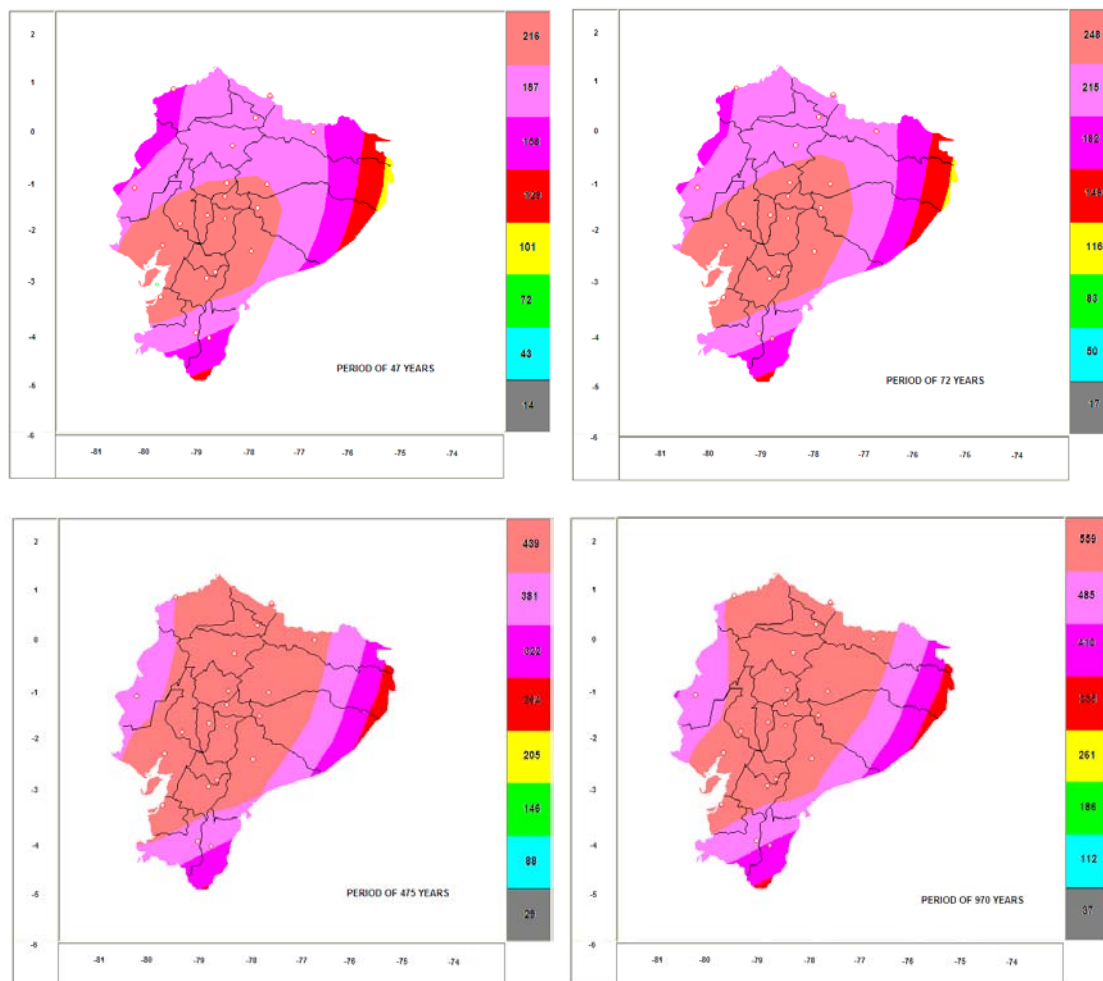


Figura 18 Mapas de peligrosidad sísmica. (Fuente: Aguiar R.)

En Esmeraldas, donde se tienen tres puentes con aisladores FPS, la aceleración, probable esperada, en roca A_0 vale 439 gals para el sismo raro y 559 gals para el sismo muy raro. En Bahía de Caráquez, estos valores son: 381 y 485 gals, respectivamente.

3 PUENTES DE ESMERALDAS

La ruta del Spondylus, es una vía costanera que atraviesa todas las provincias del Ecuador que limitan con el Océano Pacífico, desde el sur en la provincia de El oro hasta el norte en la provincia de Esmeraldas. En esta última provincia se han construido cuatro puentes los mismos que se indican en la figura 1.19, en tres de ellos se han construido con aisladores de base FPS (Frictional Pendulum System) y el cuarto con apoyos de neopreno. Los puentes con aisladores FPS son: el Puente Sur que tiene una longitud de 160 m.; el Puente Norte que mide 120 m., y el Puente Norte 1 que tiene una longitud de 108 m. El Puente Principal tiene una longitud de 434m., está sobre apoyos de Neopreno. A continuación se describen cada uno de los puentes que tienen aisladores de base FPS.

3.1 Puente Norte 1

En la parte superior izquierda de la figura 20, se muestran los aisladores FPS, antes de ser colocados con sus respectivos pernos de anclaje. Las dimensiones aproximadas del FPS son de 1.0 m., por 1.0 m. y 0.30 m., de alto. En la parte superior e inferior se encuentran dos placas de acero que le proporcionan una notable rigidez en sentido vertical, en cada placa existen cuatro aberturas por donde pasan los pernos de anclaje que tienen una longitud de 0.40 m.; cada aislador pesa 1.5 T. Estos aisladores se colocaron en todos los puentes de Esmeraldas.

En la parte superior derecha de la figura 20, se aprecia el apoyo central del puente, lo que aparece en la foto es la pila circular que tiene un diámetro exterior de 6.0 m., y un diámetro interior de 4.80 m.; sobre ésta pila se encuentra la viga superior, cuyas dimensiones en planta son 3.0 m., por 16.60 m., y tiene una altura de 1 m. Sobre esta viga se colocaron 3 aisladores FPS en la posición que se indica en la fotografía.

Ahora, en la parte central izquierda de la figura 20, se observa un aislador FPS colocado sobre uno de los estribos, que dicho sea de paso son estribos tipo cajón. En la fotografía se ven 2 de los 8 pernos de anclaje, en la parte superior hay 2 más y en la parte inferior existen 4 pernos sobre la viga de apoyo del FPS, las camisas de los pernos de anclaje que están bajo el FPS fueron colocadas antes de fundir la viga de apoyo que tiene 2.10 de base y 1.20 m., de alto. En la fotografía aparece también la viga transversal de acero y parte de 2 de las 6 vigas longitudinales de acero.

Continuando con la descripción gráfica del PN1, en la parte central derecha de la figura 1.20 se presenta el apoyo central, ya descrito anteriormente pero ahora se ve el cabezal circular de 16.0 m., de diámetro que está soportada por 12 pilotes de 1.22 m., de diámetro colocados en forma radial. La altura del cabezal es de 1.50 m.; se ve también las 6 vigas de acero longitudinales que atraviesan los dos vanos del puente. Por cierto el puente tiene dos estribos exteriores y una apoyo central, son dos luces de 54 m., cada una. Por lo tanto, la longitud del puente es de 108 m., y esta es la longitud de las vigas continuas de acero que tiene una sección transversal tipo *I* cuyas dimensiones del ala y del alma son variables de acuerdo al sitio en que se encuentran dentro del puente, la altura de estas vigas es de 2.47 m.

Siguiendo con la descripción gráfica, se hace referencia a la parte inferior izquierda de la figura 20, en donde se aprecia al fondo uno de los estribos tipo cajón, la ubicación de los 3 FPS colocados, la viga longitudinal de acero y sobre esta se tiene el tablero del puente que es de hormigón armado de 0.25 m., de espesor. En la fotografía sobresale una de las veredas del puente que tiene un ancho de 1.65 m. Se destaca que el tablero del puente no se apoya sobre la pared que aparece en la fotografía del estribo, están separados más de 3cm., esto con el objeto de que toda la superestructura que se halla sobre el FPS se mueva libremente en los dos sentidos.



Figura 19 Ubicación de los Puentes de Esmeraldas

Finalmente, en la parte inferior derecha de la figura 20, se muestra una vista aérea del PN1, se aprecia los estribos cajón que no han sido terminados de construir, falta colocar el material pétreo que va dentro de las paredes del cajón y tablero, con sus acabados. El puente es de cuatro carriles, tiene veredas a los dos lados y un parterre central; el ancho total del puente es de 18.90 m. Aguiar (2010).

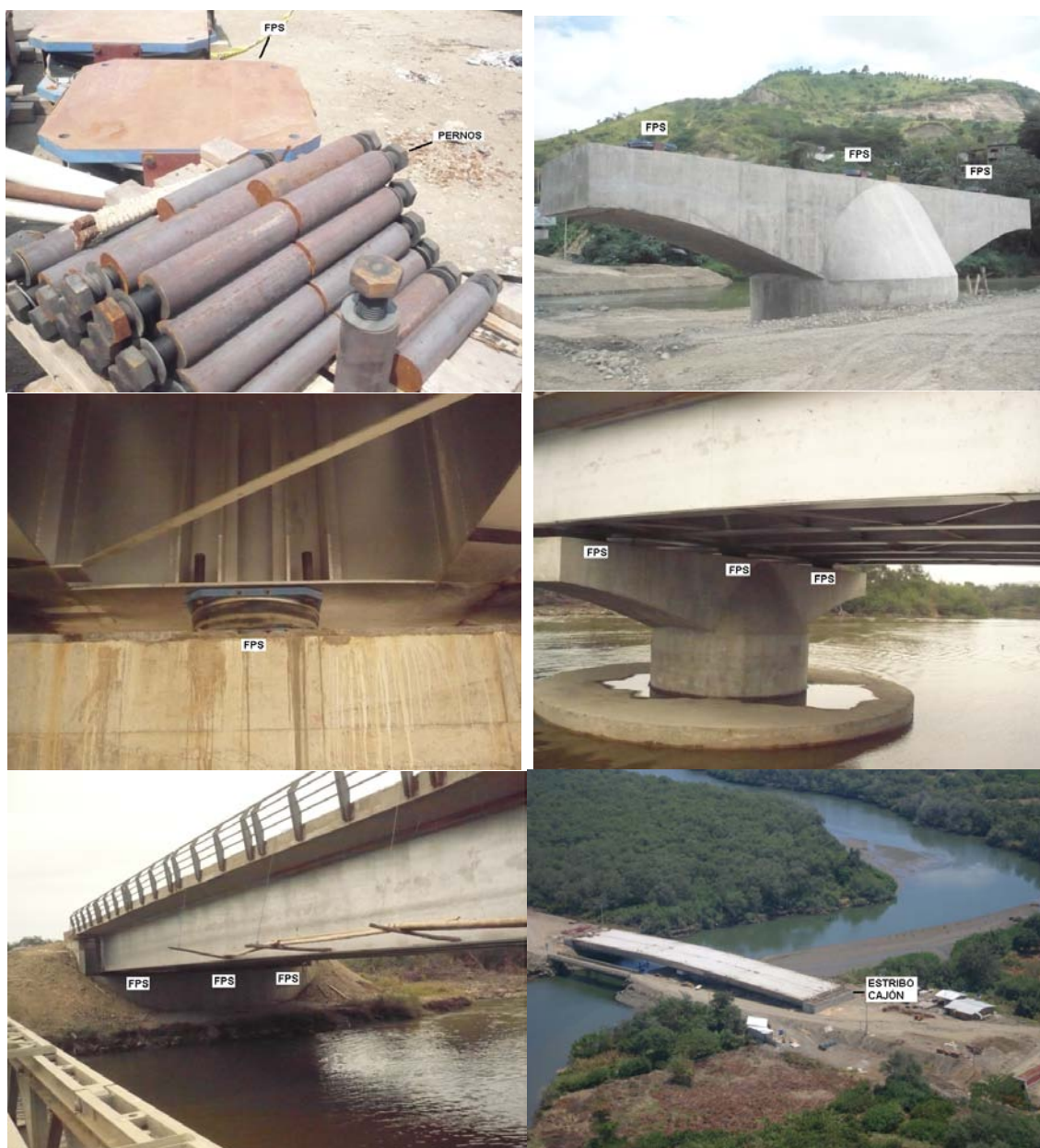


Figura 20 Descripción del Puente Norte 1.

Cada uno de los estribos tiene 24 pilotes de aproximadamente 6 m., de longitud cada uno, el apoyo central tiene 12 pilotes de 9 m., de longitud. En consecuencia el PN1 tiene 60 pilotes circulares de 1.22 m., de diámetro. En la longitud indicada no se contempla la dimensión del pilote que está inmersa en el cabezal de 1.50 m., de alto. En la figura 21 se muestran los pilotes de uno de los estribos, los mismos que tienen una camisa de acero de 1.0 cm., de espesor colocados para protegerle al hormigón de la corrosión.

En la parte superior izquierda de la figura 22 se muestra la construcción de la pila circular hueca. Las vigas de acero son de sección variable, en efecto las dimensiones del perfil tipo *I* va variando de acuerdo al nivel de esfuerzos que va a tener, esto se muestra a la derecha de la figura 22.



Figura 21 Pilotes de los Estribos del Puente Norte 1.

La forma como se va a construir un puente es fundamental para tomar las precauciones del caso en el diseño, sobre todo cuando se tienen luces considerables. En el presente caso hicieron un relleno transitoria en la mitad del río, por la otra mitad seguía circulando el agua y en la parte rellena construyeron con mucha facilidad los elementos del puente. En la parte inferior izquierda de la figura 22 se aprecia que se tiene un camino por el cual llevaron las seis vigas en grupos de a dos; con la ayuda de un vehículo llevaron las vigas y con una grúa las colocaron en su respectivo sitio. Por cierto en esta figura se aprecia la pila central con los tres FPS ya colocados, en el estribo todavía no están colocados estos dispositivos de control.



Figura 22 Descripción de la construcción del Puente Norte 1.

En la parte inferior derecha de la figura 22 se ve como una parte del río está relleno y la otra no. Se aprecia también los dos estribos tipo cajón del Puente Norte 1 y la Pila Central; las 6 vigas de acero han sido ya colocadas y fueron soldadas en toda su longitud de tal manera que van a trabajar como un todo.

En este artículo no se presenta ningún modelo de análisis ya que el objetivo principal es describir las estructuras que han sido construidas con aisladores de base, presentar ciertos detalles que se deben tener muy en cuenta en la construcción de este tipo de obras.



Figura 23 Detalles constructivos del Puente Norte.

3.2 Puente Norte

El Puente Norte, está conformado por dos estribos tipo cajón cerrados sobre una cimentación de hormigón ciclópeo de 2 m., de altura y una pila central que descansa sobre 10 pilotes de 1.22 m., de diámetro cimentados a 17 m., de profundidad. Por lo tanto, el puente tiene 3 apoyos y sobre cada uno de ellos se han colocado 3 aisladores FPS (Frictional

Pendulum System), de tal manera que el puente tiene 9 aisladores tipo péndulo de fricción.

La superestructura está compuesta por 6 vigas de acero estructural ASTM A-588, con características especiales de resistencia a la oxidación, tipo *I*, de espesor variable los mismos que se apoyan sobre los 9 aisladores sísmicos. Sobre estas vigas se encuentra el tablero del puente, que es una losa maciza de hormigón armado de 0.25 m; luego se tiene una capa de asfalto de 0.075 m., con sus respectivas veredas y parterre central. El ancho del puente es de 18.90 m., que permite tener cuatro carriles.

En la parte superior izquierda, de la figura 23 se aprecian las camisas de acero que recubren a los 10 pilotes del central, en la fotografía se aprecia que se preparan para la construcción de la viga cabezal, que en realidad es una losa maciza que va en la parte superior de los pilotes de 1.50 m., de alto.

En la parte superior derecha, de la figura 23 se aprecia la Pila circular que en su parte inferior es maciza de 1.0 m., de alto; el diámetro de la pila es de 6.0 m., luego en una altura de 1.28 m., se tiene una pila circular hueca con la misma dimensión exterior y con un diámetro interior de 4.80 m., de modo que el espesor de la pila es de 0.60 m. Finalmente en la parte superior se tiene un cono truncado de ahí que los hierros de la parte superior son inclinados; en la gráfica se aprecia también la armadura de la viga transversal que es de altura variable.

Continuando con la descripción del Puente Norte, en la parte central izquierda de la figura 23 se aprecia uno de los estribos cajón del puente en el cual se han colocado los 3 aisladores FPS. La altura desde la base de los aisladores hasta la parte inferior del tablero del puente es de 2.90 m. En la parte central derecha de la figura 23 se tiene una vista posterior del estribo del puente, los hierros verticales que aparecen irán inmersos en el tablero del puente.

Las vigas longitudinales de acero, de 3 m., aproximadamente de altura se construyeron en pares de dos; en la parte inferior izquierda de la figura 23 se muestra una de ellas ya colocada sobre el puente en que se aprecia parte de los arriostramientos laterales. Al fondo, en la parte central inferior se observa el aislador FPS.

Para terminar con la descripción de la figura 23, se debe indicar que en la parte inferior derecha se muestra una vista longitudinal del puente. Es interesante notar que se tiene una sola viga de acero de 120 m., de longitud, claro está que existe un punto en el cual se traslapan las vigas, este detalle se presenta en la descripción del Puente Sur.

Lo interesante es notar que la concepción estructural de los Puentes: Norte 1, Norte y Sur, es que el puente como tal trabaje como un todo, de tal manera que solo existan juntas de construcción en sus extremos, en la unión con los estribos tipo cajón.

Por cierto los estribos de todos estos puentes tienen la misma geometría lo que cambia son las dimensiones de sus elementos, así por ejemplo las dimensiones de las vigas de apoyo de los aisladores varía entre 1.0 m., y 1.20 m., de alto; el ancho es constante y vale 2.0 m. Los estribos están compuestos por losa de cimentación, paredes de hormigón, vigas de apoyo de los FPS y tapa de hormigón. Las celdas o paredes de hormigón son rellenas con material granular seleccionado para darle más peso y mayor estabilidad.

En la parte superior izquierda de la figura 24 se aprecia la junta de construcción que separa el puente propiamente dicho con el estribo. Nótese que la junta tiene una dimensión de 50 cm., para que los FPS puedan moverse libremente en forma horizontal. En la parte superior derecha se ven las planchas de acero que van a colocarse sobre la junta de construcción. Nótese que en la losa del tablero del puente se fundió unos elementos de acero sobre los van a apoyarse los tapa juntas.



Figura 24 Junta de construcción y vista superior y lateral del Puente Norte

En la parte inferior izquierda de la figura 24 se aprecia el Puente Norte, sin la carpeta asfáltica, se aprecia una de las veredas con sus respectivos pasamanos y el parterre central. En la parte inferior derecha se observa el espacio entre las vigas longitudinales y la pared exterior del estribo, de tal forma que los FPS puedan moverse en sentido transversal al puente; también existe una separación entre el tablero del puente y el borde exterior del estribo.

3.3 Puente Sur

El Puente Sur tiene 160 m., de luz, con dos apoyos centrales y dos estribos tipo cajón en los extremos los mismos que están cimentados directamente no así los apoyos centrales que se encuentran sobre 10 pilotes prebarrenados de 1.22 m., de diámetro e hincados a 17 m., de profundidad.

En la parte superior izquierda de la figura 25 se observan las 6 vigas de acero estructural ASTM A588. Se destaca que los tramos exteriores son de 60 m., de luz y el tramo central que va de Pila a Pila es de 50 m., de luz. En la parte superior derecha de la figura 25 se aprecia que se construyeron las vigas de una longitud tal que pasa el apoyo unos 10 m., aproximadamente; esto se aprecia con mayor detalle en la fotografía inferior izquierda de la figura 25 en donde además se ve que en el ala inferior de las vigas de acero se tiene una mayor longitud que sirve de traslape para el resto de la viga. Para terminar con la descripción de la figura 25 se debe indicar que en la figura inferior derecha se aprecia la viga transversal o diafragma apoyado sobre el aislador, dentro del estribo tipo cajón.



Figura 25 Vigas de acero del Puente Sur.

En la parte superior izquierda de la figura 26 se muestra una Pila del Puente Sur y al fondo se aprecia uno de los Estribos tipo Cajón. Sobre la Pila Central ya se han colocado los tres aisladores FPS. Como se anotó anteriormente en el proceso constructivo se desvió el cauce del río para facilitar la construcción pero una vez terminado el agua empezó a circular normalmente, lo que se aprecia en la figura superior derecha de la figura 26 donde se ven dos de las Pilas circulares, en primer plano, se ve también las vigas de acero; el tablero del puente y los pasamanos.

En la parte inferior izquierda de la figura 26 se aprecia la parte posterior de uno de los estribos que tiene mayor altura que los otros y se ve que exteriormente tiene la forma de una “C”. En la parte inferior derecha se aprecia la tapa junta del puente, que está compuesto por tres placas de acero, dos en la parte inferior y una tercera que cubre la junta propiamente dicha en la parte superior, esta última se encuentra apoyada sobre las otras dos.

4 AISLADORES FPS

Si bien es cierto se han presentado varias fotografías de los aisladores de base FPS., y de sus pernos de anclaje pero todavía no se lo ve como es por dentro. Para esto en la figura 27 se presenta un corte transversal de un aislador FPS, colocados en los puentes de Esmeraldas. Se aprecia que se tiene un aislador de doble curvatura de dimensiones pequeñas dentro de otro aislador de doble curvatura de mayor dimensión. Este aislador se conoce también con el nombre de aisladores de la tercera generación o aisladores triple péndulo.

Los FPS de la primera generación tienen una superficie recta y una superficie cóncava; los de la segunda generación tienen tanto la superficie superior como inferior concavidad y los de la tercera generación tienen un aislador dentro de otro aislador. Aguiar *et al.* (2008).



Figura 26 Elementos estructurales del Puente Sur.

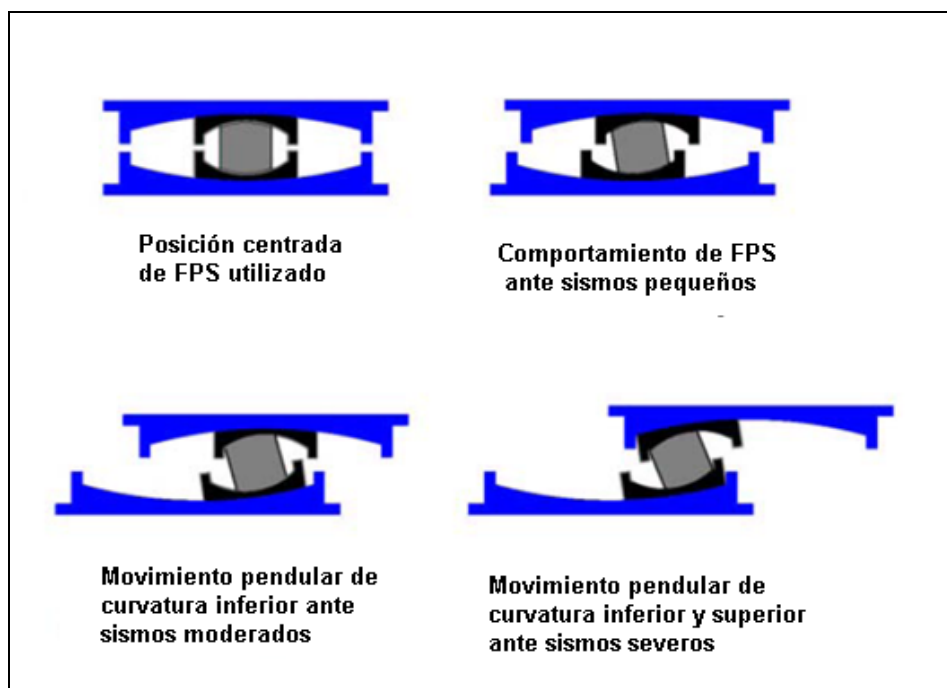


Figura 27 Descripción de FPS, triple péndulo.

Ante sismos pequeños la disipación de energía se realiza básicamente en el aislador interior, como se aprecia en la figura derecha superior de 27. Ante sismos de mayor magnitud

la disipación de energía se da en el aislador interior y en la concavidad inferior del aislador exterior, como se ilustra en la figura inferior izquierda de 27. Finalmente ante un sismo extremadamente fuerte, se disipa energía en las dos superficies cóncavas del aislador interior y en las dos superficies cóncavas del aislador exterior, como se tiene en la figura inferior derecha de 27.

5 MONTAJE DE LAS VIGAS

Cuatro puentes se construyeron en Esmeraldas, tres de ellos tienen aisladores de base y el cuarto tiene apoyos de Neopreno. En la figura 28 se muestra como se colocaron las vigas en el último puente.

Al fondo de la fotografía, de la parte superior izquierda de 28, se aprecian las vigas de acero que han sido fabricadas. Ahora bien, para colocarles en el puente se construyó dos celosías sobre una plataforma flotante de madera y mediante tres embarcaciones se fue llevando esta viga que tiene más de 50 m., de luz hasta su destino, a la izquierda se observa el traslado de la viga y a la derecha de la figura 28, se aprecia cuando va llegando a su destino.

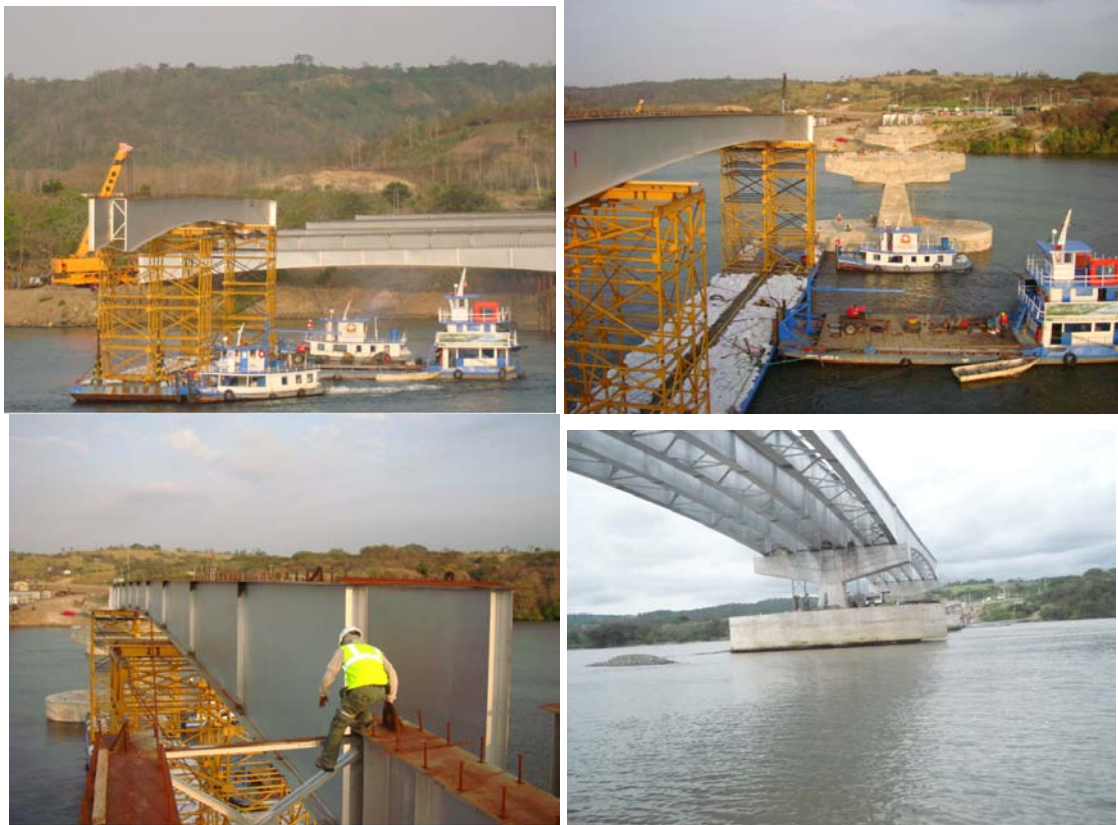


Figura 28 Montaje de las vigas de acero para el Puente Principal. (Septiembre de 2009)

Las tres embarcaciones llevan a la viga de acero hasta su posición final, como se aprecia en la figura 28. De esta manera el montaje de las vigas de acero es muy sencillo, la clave está en la celosía de acero que se encuentra sobre una plataforma flotante. En la parte inferior izquierda de la figura 28 se aprecia como va llegando la viga de acero a su posición final y en la parte inferior derecha se muestran varios apoyos del Puente Principal con sus vigas de acero.

6 CONCLUSIONES

Dos son los objetivos principales de este artículo, el primero mostrar un estudio de Peligrosidad Sísmica del Ecuador y el segundo enseñar los aspectos constructivos más sobresalientes de los puentes ubicados sobre el estuario del Río Esmeraldas con aisladores de base FPS.

Para el primer objetivo se presentó un recuento de la sismicidad histórica del Ecuador, las zonas fuentes utilizadas en el estudio, las leyes de atenuación empleadas y el resultado se presenta en cuatro mapas de igual aceleración máxima del suelo en roca, para períodos de retorno de 47, 72, 475 y 970 años. Se aspira a que este aporte sirva de base para una nueva zonificación sísmica del Ecuador.

Para el segundo objetivo se presentó una gran cantidad de fotografías que ilustran la construcción de los puentes: Norte 1 de 104 m., de luz, Norte de 120 m., de luz y Sur de 160 m., de luz, todos ellos con aisladores de base tipo péndulo de fricción de la tercera generación. De igual manera se espera que esto sea un aporte para los proyectistas estructurales de puentes con aisladores de base ya que existen una serie de consideraciones que son diferentes a la construcción de puentes sin sistemas de aislación.

AGRADECIMIENTO

El presente artículo es parte del proyecto de investigación financiado por la Escuela Politécnica del Ejército, titulado: "Aisladores de base tipo Péndulo de Fricción", por lo que se deja constancia de un sincero agradecimiento a las autoridades de la Institución, en especial al Crnl. Carlos Rodríguez, Rector de la ESPE y al Crnl. Rodolfo Salazar, Vicerrector de Investigación Científica.

REFERENCIAS

1. Abrahamson N., Silva W., (2008), "Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion relations", *Earthquake Spectra, EERI*, **24 (1)**, 67-97.
2. Aguiar R., (1982), *Cuantificación de la amenaza sísmica del Ecuador en términos probabilísticos y mapa de zonificación*, Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Central de Venezuela, 179 p., más anexos, Caracas, Venezuela.
3. Aguiar R., Romo M., Torres M., Caiza P., (1998), *El sismo de Bahía*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 125 p., Quito, Ecuador.
4. Aguiar R., (2000), *Sismo de Macas de 1995 y la reconstrucción*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 72 p., Quito, Ecuador.
5. Aguiar R., Almazán J. L., Dechent P., Suárez V., (2008), *Aisladores de base elastoméricos y FPS*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 292 p., Quito.
6. Aguiar R., Castro C., (2009, 1), "Zonas fuentes para estudios de la peligrosidad sísmica en el Ecuador", *Antología científica de Ingeniería Estructural y Sísmica en Países Andinos*, 87-111, Guayaquil, Ecuador.
7. Aguiar R., Castro C., (2009, 2), "Leyes de atenuación para estudios de peligrosidad sísmica en el Ecuador", *Revista Ciencia. Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército*, **12 (2)**, 122-145, Quito, Ecuador.

8. Aguiar R.,García E.,Villamarín J., (2010), "Leyes de atenuación para sismos corticales y de subducción para el Ecuador", *Revista Ciencia. Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército*, **13 (1)**, 1-18, Quito, Ecuador.
9. Aguiar R., (2010), "El PN1 un puente sismo resistente con FPS", *Revista CONSTRUCCIÓN. Cámara de la Construcción de Pichincha*, **209**, 28-32, Quito.
10. Aguilar A., (2001), *CRISIS)).1. Sistema de cómputo para el cálculo de peligro sísmico*, Tesis para obtener el título de Maestro en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería., 96 p. México.
11. Algermissen S. T., Perkins D. M., (1976) "A probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States", *Geological Survey Open-File, Report 760416*, 45 p.
12. Almazán J. L., (2001), *Torsión accidental y natural en estructuras aisladas con el sistema de péndulo friccional*, Tesis Doctoral. Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, 287 p., Santiago de Chile.
13. Astroza M., (2007), "Reinterpretación de las intensidades del terremoto de 1906", *VI Congreso Chileno de Geotecnia*, 14 p., Valparaíso, Chile.
14. Baldock J., (1982), *Geology of Ecuador*, Explanatory Bulletin of the National Geological Map of the Republic of Ecuador.
15. Boore D., Atkinson G., (2008), "Ground-Motion Prediction Equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5% Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10 s.", *Earthquake Spectra, EERI*, **24 (1)**, 99-138.
16. Campbell K., Bozorgnia Y., (2008), "NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10s.", *Earthquake Spectra*, **24 (1)**, 139-171.
17. Callo F., Tavera H., (2002), "Estimación de Mw a partir de isosistas de intensidad máxima para sismos de subducción ocurridos en el Perú", *Compendio de trabajos de investigación, CNDG-Biblioteca, Instituto Geofísico del Perú*, **V. 3**, 59-70, Lima.
18. Chiou B., Youngs R., (2008), "An NGA model for the average horizontal component of Peak ground motion and response spectra", *Earthquake Spectra, EERI*, **24 (1)**, 173-215.
19. Chunga K. (2009), "Zonificación sísmica a través del análisis estructural de fallas geológicas y sismicidad histórica e instrumental", *Encuentro Internacional sobre Gestión del Riesgo Natural con énfasis en el Sector Eléctrico. Universidad San Francisco de Quito*, Quito
20. Chunga K.,Michetti A.M., Pazmiño N., Martillo C., Romero A.,Quiñónez M., (2009), "Estimación de máximos niveles de sismicidad para el litoral ecuatoriano a través de la integración de datos geológicos, sismológicos y sismotectónicos", *Gruppo di Geologia Ambientale Revista Internacional Oro y Petróleo* (3) in press.
21. Chunga K., Michetti A.M. (2009), "Estructuras sismogenéticas y sus efectos cosísmicos en el terreno: Aplicación de la Escala de Intensidad Macrosísmica ESI-2007", *Encuentro Internacional sobre gestión del Riesgo Natural con énfasis en el Sector Eléctrico. Universidad San Francisco de Quito*, Quito, Ecuador.

22. Crouse C., (1991), "Ground-motion attenuation equations for earthquakes on the Cascadia subduction zone", *Earthquake Spectra*, **Vol 7, N.- 2**.
23. Cornell C. A., Vanmarcke E., (1969), "The mayor influence on seismic risk", *Proc. 4WCEE, Universidad de Chile*, **Vol 1 A-1**, 69-83, Santiago de Chile.
24. Dorbath L., Cisterna A., Dorbath C., (1990), "Assessment of the siza of large and great historical earthquakes in Peru", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **80 (3)**, 551-576.
25. Egred J. (1999), *Los terremotos y su incidencia en el Ecuador*. Instituto Geofísico. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
26. Eguez, A., Alvarado, A., Yepes, H., Machette, M.N., Costa, C.H., Dart, R.L., and Bradley, L.-A., (2003), *Database and map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions*, U.S. Geological Survey Open-File **Report 03-289**.
27. Fenz D., Constantinou M., (2006), "Behaviour of the double concave Friction Pendulum bearing", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **35**, 1403-1424.
28. Gallego M., (2000), *Estimación del riesgo sísmico en la República de Colombia*, Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, 108 p., México.
29. Gallego M., (2006), "Sobre el origen de la Ingeniería Sísmica", *Revista de Ingeniería Sísmica*, **74**, 33-82, México.
30. Gallego M., Sarria A., (2006), *El Concreto y los terremotos. Conceptos, Comportamiento, Patología y Rehabilitación*, Colección Especializada de Concreto. Instituto del Concreto, 310 p. Bogotá, Colombia.
31. Housner G. W., (1956) "Limit designo f structures to resist earthquake", *Proceedings of the 1956 World Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute*, San Francisco.
32. Iglesias R., Eguez A., Pérez V., Molina G., (1991), *Mapa Sismotectónico del Ecuador*, Memoria Técnica. Escuela Politécnica del Ejército, 188 p., Quito, Ecuador.
33. INOCAR (2009), *Estudio de Tsunamis. Eventos en el Ecuador*, www.inocar.mil.ec.
34. JICA (1981), "Informe de Peligrosidad Sísmica del Proyecto Hidroeléctrico Chespi", *JICA Consultores. INECEL Instituto Ecuatoriano de Electrificación*, 201-222, Quito, Ecuador.
35. Katayama T., (1975), "Fundamentals of probabilistic evaluation of seismic activity and seismic risk", *SEISAN-KENKYU* (Monthly Journal of Institute of Industrial Science) Univerity of Tokyo, **27 (5)**, 1-11.
36. Manns P. (1972), *Los terremotos en Chile*, [http:// angelfire.com/nt/terremotovalparaiso](http://angelfire.com/nt/terremotovalparaiso).
37. McGuire R., (1974), "Seismic Structural Response Risk Analysis Incorporating Peak Response Regressions on Earthquake Magnitude and Distance", *Massachuset Institute Technology*, 74-51.

38. McGuire R., (1976), "Fortran computer program for seismic risk analysis", *United States Department of the Interior Geological Survey*, Open-File Report 76-67, 90 p.
39. Oliveira C., (1974), *Seismic risk analysis*, Earthquake Engineering Reserch Center EERC, **74 (1)**, 102 p., University of California, Berkeley.
40. Palacios G., Blum E., Maruri R., Rodríguez J., Yupanqui F., Peña J., (1987), *Determinación de la distribución de los niveles de aceleración en el País y regionalización con fines de prevención sísmica*, Instituto de Investigaciones y Estudios Avanzados. Universidad de Guayaquil, 89 p., Guayaquil. Ecuador.
41. Pasquaré G., (1988), *Sismología y Tectónica*, Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair. Anexo H. INECEL Instituto Ecuatoriano de Electrificación, 152 p., más anexos, Quito, Ecuador.
42. Rudolph E., Szirtes S., (1911), "Das kolumbianische erdbeben vom 31, jaguar 1906", *G. Beitr.*, **11**, 132-199, 208-275.
43. Ruff L. J., (1996), "Large earthquakes in subduction zones, segment interaction and recurrence times". In: *Bebout, G. E., Scholl, D. W., Kirby, S. H. Platt, J. P. (Eds). Subduction top to bottom. Geophysical Monograph*, **96**, 91-104.
44. Ruiz S., Saragoni R., (2005), "Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos de sismo génesis y los efectos de suelo", *IX Jornadas. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, 15 p., Concepción, Chile.
45. Saragoni R., Crempien J., y Ayala R., (1982), "Características experimentales de los movimientos sísmicos sudamericanos", *Revista del IDIEM*, **21 (2)**, 67-86, México.
46. SEAOC (1995), *VISION 2000 Report on performance based seismic engineering of buildings*, Structural Engineers Association of California, Volumen I, Sacramento.
47. Swenson J. L., Beck, S. L., (1996), "Historical 1942 Ecuador and 1942 Peru subduction earthquakes, and earthquake cycles along Colombia-Ecuador and Peru subduction segments". *PAGEOPH*, **146**, 67-101.
48. Tibaldi A., León J. R., (2000), "Morphometry of late Pleistocene-Holocene faulting and volcanotectonic relationship in the southern Andes of Colombia". *Tectonics*, **19**: 358-377.
49. Toulkeridis T., (2009), "Geodinámica y Vulcanología del Ecuador (Continental e Insular) Amenazas, Vulnerabilidad y Riesgos", *Encuentro Internacional sobre gestión del Riesgo Natural con énfasis en el Sector Eléctrico. Universidad San Francisco de Quito*, Quito, Ecuador.
50. Winter T., Avouc J. P., Lavenu A., (1993), "Late Quaternary kinematics of the Pallatanga strike-slip fault (central Ecuador) from topographic measurements of displaced morphological features", *Geophys. J. Int.*, **115**: 905-920.
51. Wikipedia (2009), "Terremoto de San Francisco de 1906", http://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_de_San_Francisco_de_1906.
52. Zayas V., Low S., Bozzo L., Mahin S., (1989), *Feasibility and performance studies on improving the earthquake resistance of new and existing buildings using the friction*

118 **Peligrosidad Sísmica del Ecuador y descripción de los puentes con FPS**

pendulum system” Earthquake Engineering Research Center. University of California at Berkeley, **Report N.- UCB/EERC-89/09**, 308 p., Berkeley, California.